

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta**

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Možnosti optimalizace anaerobního zpracování
zemědělských odpadů**

Ing. Jiří Rusín

Studijní program: Inženýrská ekologie

Studijní obor: Ochrana životního prostředí v průmyslu

Školitel: Prof. Ing. Karel Obroučka, CSc.

Ostrava, srpen 2007

ANOTACE

Bioplynové systémy jsou jednou z možností získání plně obnovitelného zdroje energie a jedním z částečných řešení trvale udržitelného rozvoje společnosti. Procesy využívané v bioplynových systémech lze řešit jako ekologicky příznivé a to i v těch případech, kdy se jedná o zpracování substrátů bohatých sírou. Tato disertační práce se zabývá optimalizací procesu anaerobní kofermentace biogenních materiálů v podmínkách zemědělských bioplynových stanic. Jsou zde shrnuty poznatky získané během mého postgraduálního studia v Centru environmentálních technologií VŠB – TU Ostrava. Předloženy jsou výsledky dvou provozních měření na zemědělské bioplynové stanici a výsledky práce na laboratorních modelových fermentorech. Vypracován byl matematický model řešící optimalizaci vlastností vstupní směsi kofermentovaných materiálů. Výsledky výzkumu by měly přispět k rozšíření dosavadních poznatků o možnostech současného zpracování zemědělských bioodpadů, zejména kejdry z bezstelivového ustájení s jinými biomateriály.

Klíčová slova:

Optimalizace anaerobního procesu, biogazifikace, biometanizace, kofermentace, kontrolovaná skladba vstupní směsi, biogenní materialy, zemědělské odpady, databáze materiálových vlastností, bioreaktor/fermentor, bioplynová stanice, digestát.

ANNOTATION

Biogas systems are one of available possibilities for gaining of completely renewable source of energy and one of the partial solutions of constantly preservable development of society. Processes utilized in biogas systems can be treated as environmentally friendly even in the case of working sulphureous substrate. This doctoral thesis addresses optimalization of anaerobic process of cofermentation of biogenous substances at biogas plant conditions. Observations acquired during my doctoral study programe at Centre for environmental technologies VŠB – TU Ostrava are summed up here. Results of two operational measurements at agricultural biogas plant and results of working at laboratory-scale model fermenters are presented. Mathematical model solving optimalization of material properties of input mixture has been elaborated. Results of this research should contribute to extension of existing knowledgebase of simultaneous utilization of agricultural wastes, primarily sewage from litterless housing and other biogenous substances.

Key words:

Optimization of anaerobic digestion process, biogasification, biometanization, co-fermentation, controlled composition of input mixture, biogenous materials, agricultural wastes, database of material qualities, bioreactor/fermentor, biogas plant, digestate.

Prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem svou dizertační práci vypracoval samostatně.

Jiří Rusín

V Ostrave dne 20. 08. 2007

.....

Děkuji všem, kteří mi poskytli zázemí a cenné rady pro vypracování této disertační práce zvláště Prof. Ing. Karlu Orboučkovi, CSc., Prof. Ing. Miroslavu Kaločovi, CSc. Také děkuji Ing. Kamilu Drobnému z Vítkovice ENVI a.s. za poskytnutí praktických doporučení.

OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	10
3	SHRNUTÍ SOUČASNÝCH POZNATKŮ	11
3.1	ANAEROBNÍ DIGESCE	11
3.2	TEORETICKÉ ZÁKLADY PROCESU	12
3.3	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRŮBĚH PROCESU ANAEROBNÍ DIGESCE	15
3.4	BIOMASA VHODNÁ PRO VÝROBU BIOPLYNU	22
3.4.1	Statková hnojiva	23
3.4.2	Fytomasa.....	25
3.4.3	Odpady ze zpracovatelského a potravinářského průmyslu	25
3.4.4	Specifické a speciální odpady.....	26
3.4.5	Biologicky rozložitelný komunální odpad	29
3.4.6	Biologicky rozložitelný průmyslový odpad.....	29
3.4.7	Kaly z ČOV.....	29
3.4.8	Jiné organické odpady	29
3.5	KO-FERMENTACE	29
3.6	VÝSTUPNÍ PRODUKTY ANAEROBNÍ DIGESCE	31
3.6.1	Bioplyn	31
3.6.2	Digestát	32
3.6.2.1	Základní vlastnosti digestátu	32
3.6.2.2	Digestáty ze statkových hnojiv	33
3.6.2.3	Digestáty z bioodpadů	34
3.7	ZÁKLADNÍ DRUHY ANAEROBNÍCH TECHNOLOGIÍ	37
3.7.1	Mokrý anaerobní digesce.....	37
3.7.2	Suchá anaerobní digesce.....	39
3.8	ZÁPACH Z PROCESU ANAEROBNÍ DIGESCE.....	41
4	PRAKTICKÉ APLIKACE MOKRÉ ANAEROBNÍ DIGESCE.....	42
4.1	BIOPLYNOVÉ STANICE A VYUŽITÍ BIOPLYNU V ČR.....	42
4.1.1	Využití bioplynu.....	45
4.1.2	Využití digestátu	45
4.2	ROZVOJ ANAEROBNÍCH TECHNOLOGIÍ V ČR	46
4.2.1	Přínosy anaerobní fermentace pro životní prostředí.....	46
4.2.2	Legislativní podpora	46
4.2.3	Podmínky výkupu elektrické energie z bioplynu.....	47
5	MOŽNOSTI OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ ANAEROBNÍHO PROCESU NA ZEMĚDĚLSKÉ BIOPLYNOVÉ STANICI	48
5.1	VÝROBA BIOPLYNU V ZEMĚDĚLSKÉ BIOPLYNOVÉ STANICI SPOLEČNOSTI GT 92, S.R.O.	48
5.1.1	Popis bioplynové stanice společnosti GT 92, s.r.o. Velké Albrechtice	48
5.1.2	Používaná technologie	49
5.2	IDENTIFIKACE STÁVAJÍCÍHO CHODU BIOPLYNOVÉ STANICE	52
5.2.1	Ověřovací provozní měření (rok 2004)	52
5.2.2	Vyhodnocení výsledků měření	55
5.2.2.1	Obsah sušiny ve vstupní směsi	55
5.2.2.2	Kvantita a kvalita vyrobeného bioplynu	55
5.2.2.3	Množství vyrobené elektrické energie	58
5.2.2.4	Výsledná bilance systému.....	59
5.2.2.5	Posouzení kvality digestátu	60
5.2.3	Závěry z provedeného provozního měření.....	61
5.3	VYHODNOCENÍ PROVOZU BIOREAKTORŮ DLE ZÁZNAMŮ V PROVOZNÍ KNIZE	62
5.4	OVĚŘENÍ MOŽNOSTI OPTIMALIZACE SKLADBY VSÁZKY	64
5.4.1	Dlouhodobé provozní měření (rok 2005)	64
5.4.2	Souhrn měřených (sledovaných) parametrů.....	64
5.4.3	Vyhodnocení výsledků měření (rok 2005)	67
5.4.4	Spotřeba kalu a masokostní moučky	67

5.4.5	<i>Spotřeba vstupní směsi</i>	68
5.4.6	<i>Analýzy vstupních surovin</i>	70
5.4.7	<i>Analýzy vstupní směsi</i>	71
5.4.7.1	Obsah celkové sušiny	71
5.4.7.2	Měrný obsah organických látek	71
5.4.7.3	Měrný obsah organického uhlíku	71
5.4.7.4	Měrný obsah celkového dusíku	72
5.4.7.5	Poměr C:N	73
5.4.8	<i>Kvantita a kvalita bioplynu</i>	73
5.4.9	<i>Produkce činné elektrické energie</i>	74
5.4.10	<i>Výsledná bilance systému</i>	76
5.4.11	<i>Posouzení kvality digestátu</i>	77
5.4.12	<i>Shrnutí a závěry z provedeného měřeného provozního experimentu</i>	78
6	KONTROLA A ŘÍZENÍ PROCESU MOKRÉ ANAEROBNÍ DIGESCE	80
6.1	ZKUŠENOSTI S KONTROLOU A ŘÍZENÍM PROCESU MOKRÉ ANAEROBNÍ DIGESCE NA ZEMĚDĚLSKÉ BIOPLYNOVÉ STANICI FIRMY GT92. S.R.O. VE VELKÝCH ALBRECHTICÍCH	81
6.2	ROZBOR PARAMETRŮ VHDNÝCH PRO ŘÍZENÍ MOKRÉHO ANAEROBNÍHO PROCESU	82
6.2.1	<i>Cíl řízení kontinuálního mokrého anaerobního procesu</i>	82
6.2.2	<i>Kritéria pro výběr vstupní směsi</i>	83
7	DATABÁZE VLASTNOSTÍ ANAEROBNĚ FERMENTOVATELNÝCH MATERIÁLŮ	87
7.1.1	<i>Tvorba databáze</i>	87
8	NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU OPTIMALIZACE ANAEROBNÍHO PROCESU	89
8.1	VÁHA DŮLEŽITOSTI SLEDOVANÝCH MATERIÁLOVÝCH VELIČIN	94
8.2	PŘÍKLAD VÝPOČTU SLOŽENÍ DÁVKY VSTUPNÍ SMĚSI	95
8.3	POČÍTAČOVÝ PROGRAM PRO OPTIMALIZACI VSTUPNÍ SMĚSI	98
8.3.1	<i>Princip funkce připravovaného počítačového programu</i>	99
9	REALIZACE FYZIKÁLNÍHO MODELU ANAEROBNÍHO BIOREAKTORU	101
9.1	MODELOVÝ DISKONTINUÁLNÍ ANAEROBNÍ BIOREAKTOR O OBJEMU 6 LITRŮ	101
9.1.1	<i>Vsázka modelových bioreaktorů</i>	102
9.1.1.1	Analytická identifikace vstupních materiálů	102
9.1.2	<i>Výstupní produkty modelové kofermentace</i>	104
9.1.2.1	Produkce a složení bioplynu	104
9.1.2.2	Analytická identifikace digestátů	111
9.1.3	<i>Zhodnocení výsledků práce na modelových bioreaktorech objemu 6 litrů</i>	115
9.2	MODELOVÝ ANAEROBNÍ BIOREAKTOR O OBJEMU 40 LITRŮ	116
10	DISKUZE VÝSLEDKŮ	121
11	ZÁVĚR	122
12	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	123
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	132
14	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	133
15	SEZNAM PŘÍLOH	134

1 ÚVOD

Při energetickém využití biomasy dosud převažují termické konverzní procesy (spalování, zplyňování, pyrolýza), avšak stále více se začíná uplatňovat i proces anaerobní digesce (anaerobní fermentace), spojený s produkcí energeticky bohatého bioplynu a následnou výrobou elektrické energie a tepla v kogeneračních jednotkách.

Nejvýznamnější použití našel anaerobní proces při čištění odpadních vod a při zpracování celé řady zemědělských odpadů (keřda z bezsteličového ustájení, chlévská mrva aj.), ale i při zpracování odpadů z potravinářského průmyslu a kafilérií, biologicky rozložitelných komunálních odpadů i při zpracování fytomasy z údržby veřejné zeleně. Z uvedeného plyne, že tento proces umožňuje zpracování celé řady organických odpadů, jejichž zneškodňování je nejen nákladné, ale často z technického hlediska problematické (např. kaly z ČOV, keřda, hnůj aj.). Výhodnost anaerobního procesu je dána i skutečností, že vedle plynného paliva (bioplynu) o poměrně vysoké výhřevnosti (cca 20 až 25 MJ/m³) je při anaerobní fermentaci získáváno i poměrně kvalitní organické hnojivo. V poslední době vzrůstá zájem o stavbu bioplynových stanic schopných zpracovávat substrát se zvýšeným obsahem sušiny vlivem přísadků organických odpadů jako je např. masokostní moučka (dále MBM z angl. Meat Bone Meal), kaly z celulózek, odpady z velkojídelen či speciálně pěstovaná snadno fermentovatelná biomasa (kukuřice, řepka, křídlatka či šťovík).

Pro podnikatelské subjekty v zemědělské prvovýrobě se změna koncepce stávajících bioplynových stanic, původně zaměřených na zneškodňování jednoho druhu odpadu (např. prasečí nebo hovězí keřdy), na řízenou výrobu bioplynu za použití vhodné kombinace organických odpadů a cíleně pěstovaných rostlin stává stále významnější. Toto technologické opatření by mělo významně zvýšit měrnou produkci bioplynu (vztahenou na jednotku objemu fermentoru) při zlepšené rentabilitě chodu bioplynové stanice. Tyto předpoklady je však nutno vědecky a výzkumně ověřit [1].

Postupný rozvoj bioplynových technologií v ČR naráží na několik základních překážek. Těmi hlavními jsou relativně vysoká pořizovací cena bioplynových stanic (pouze sdružení více investorů je schopno financovat „hi-tech“ technologie) a složitá legislativa. Je zřejmé, že další rozvoj anaerobních technologií závisí na efektivnosti produkce bioplynu a následné výroby elektrické energie.

V rámci řešení resortního projektu MŽP ev. č. VaV/720/15/03 s názvem „Možnosti tepelné dekontaminace (starých zátěží) masokostní moučky“ [2] byla navázána spolupráce při ověřování a zdokonalování anaerobního procesu při energetickém využívání MBM s firmou GT 92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích, která tento postup výroby bioplynu v roce 1995 pokusně zavedla. Firma se vedle výroby jatečných prasat mj. zabývá i výrobou a prodejem elektrické energie do veřejné sítě. Elektrická energie je vyráběna generátory kogeneračních jednotek, spalujících bioplyn, vyráběný v bioplynové stanici v prostorách farmy, a to anaerobní digescí prasečí keřdy (s obsahem sušiny 3 až 4 % hm.), do níž je za účelem zvýšení obsahu organické sušiny a tedy i produkce vyráběného bioplynu přidávána rovněž MBM.

V rámci této spolupráce byly na bioplynové stanici firmy realizovány měřené provozní experimenty, jejichž cílem byla jednak identifikace procesu, jednak ověření možností zvýšení výroby bioplynu cestou úpravy složení vstupní směsi (zvýšení obsahu sušiny) do fermentorů směřujících ke zvýšení výroby bioplynu a následně elektrické energie.

Na problematiku anaerobní digesce a možnosti jejího zefektivnění z hledisek ekologických i ekonomických je zaměřena předložená disertační práce.

2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je **zpracování návrhu optimalizace procesu anaerobní kofermentace biogenních materiálů v podmínkách zemědělských bioplynových stanic**. Výsledky výzkumu by měly přispět k rozšíření dosavadních poznatků o možnostech současného zpracování zemědělských bioodpadů, zejména kejdy z bezstelivového ustájení ve směsi s jinými biomateriály.

Práce je v první fázi zaměřena na teoretický rozbor procesu anaerobní digesce a zhodnocení současného stavu poznání tohoto procesu. Jsou hledány vazby mezi jednotlivými činiteli určujícími průběh anaerobního procesu, na jejichž podkladě bude možno sestavit matematický model procesu řízení skladby vstupní směsi do fermentorů. V další fázi práce je pozornost věnována laboratornímu výzkumu a tvorbě databáze vlastností kofermentovatelných materiálů. Databáze se stane výchozím podkladem pro uplatnění počítačového programu řízení skladby vstupní směsi, který bude možno v budoucnu sestavit na základě navrženého matematického modelu. Prioritním požadavkem je navýšení tvorby bioplynu a v něm obsaženého metanu.

Náplň práce byla realizována následujícím postupem:

- 1) **Rozbor současného stavu poznání v oblasti kofermentace biogenních materiálů a vymezení kritérií, které jsou pro proces anaerobní digesce rozhodující.**
- 2) **Zhodnocení současných technologických postupů anaerobní digesce.** Důraz je kladen zejména na technologii mokré metody anaerobní fermentace v podmínkách zemědělských bioplynových stanic v ČR.
- 3) **Experimentální ověření relevantních vlastností biogenních materiálů, jež připadají v úvahu pro kofermentaci.** Laboratorně byly stanoveny hlavní materiálové vlastnosti biogenních látek, důležité pro anaerobní digesti. Na základě získaných údajů byla vytvořena databáze těchto vlastností.
- 4) **Návrh matematického modelu pro řízení skladby vstupní směsi.** Na základě získaných poznatků byl zpracován matematický model pro mísení kofermentovatelných materiálů s ohledem na nejvyšší výtěžky bioplynu.
- 5) **Realizace laboratorních i provozních experimentů, které umožní rozhodování o složení směsi kofermentovatelných materiálů.** Byla získána data o plynodajnosti a chování konkrétních směsí materiálů při konkrétních procesních podmínkách.
- 6) **Vyhodnocení dosažených výsledků, návrh a ověření optimalizačních opatření pro provoz bioreaktorů.** Na základě získaných výsledků bylo možno vyslovit závěry o chování jednotlivých směsí biogenních materiálů a doporučení týkající se provozního režimu případně technologie anaerobních bioreaktorů.

3 SHRUTÍ SOUČASNÝCH POZNATKŮ

3.1 Anaerobní digesce

Anaerobní digesce znamená kontrolovanou mikrobiální přeměnu organických látek bez přístupu vzduchu za vzniku plynného podílu (bioplyn) a kapalného a tuhého zbytku (digestátu) [3]. Proces vyvolávají vhodné kultury anaerobních mikroorganismů [4].

Termín *anaerobní digesce* má několik synonym, např. *anaerobní fermentace*, *anaerobní stabilizace*, *anaerobní vyhnívání*, *biometanizace* či *biogasifikace*, jejichž použití závisí na konkrétních způsobech uplatnění tohoto procesu. Například v technologiích čištění odpadních vod se proces nazývá *anaerobní stabilizace kalů* či zkráceně *stabilizace*. V přírodě se anaerobní prostředí hojně vyskytují v podobě sedimentů, zamokřených půd, rýžových polí, travních systémů aj. Vznikající plyn vždy obsahuje značná množství metanu. Do ovzduší unikající metan a oxid uhličitý se podstatnou měrou účastní atmosférického uhlíkového cyklu [5].

Anaerobní digesce je technologicky a energeticky výhodný proces odstraňování respektive využívání odpadů, obsahujících významný podíl organických látek. V současnosti je tento proces uplatňován ve všech vyspělých státech světa v mnoha modifikacích zejména k zužitkování zemědělských a potravinářských odpadů a je neustále zdokonalováno řízení procesu. Hlavní uplatnění anaerobního procesu je při čištění odpadních vod. Odstranění jednotkového množství znečištění anaerobním způsobem je vždy ekonomicky výhodnější než aerobním způsobem [6].

Zjednodušeně lze říci, že anaerobní metanovou fermentací organických materiálů lze získat dva dále využitelné materiálové proudy – spalitelný plyn (bioplyn) a stabilizovanou biomasu (fermentát či digestát), která by měla být z hlediska hygienického a senzorického nezávadnou pro životní prostředí. Bioplyn je většinou energeticky využíván pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Elektřina je buď prodávána do sítě nebo využívána pro krytí vlastní spotřeby a pro přebytky tepla je účelné nalézt další využití [7].

Anaerobní fermentace je doprovázena velmi výraznou redukcí přirozené pachové zátěže (fermentace probíhá v plynotěsném reaktoru), snížením leptavého účinku kejdy, zlepšení tekutosti kejdy, nižší ztrátou dusíkatých živin (oproti otevřenému skladování kejdy a hnoje) a úsporou poplatků za stočné (redukce objemu vypouštěných znečištěných vod). Proces není doprovázen žádnými dalšími emisemi nežádoucích chemických komponent a lze jím rovněž docílit hygienizaci fermentačního zbytku a podstatné snížení klíčivosti semen (tedy i plevelů) [8].

Výzkum procesu anaerobního vyhnívání je spjat se jmény jako například Volta, který již v roce 1770 jímá a spaloval bahenní plyn ze sedimentu hornitalských jezer. Faraday identifikoval zkoumaný bahenní plyn jako uhlovodík. Avogadro sestavil roku 1821 chemický vzorec metanu CH_4 . Pasteur roku 1844 navrhnul použití koňského hnoje z pařížských povozů k výrobě plynu pro pouliční osvětlení. Koncem 19. století byla zjištěna uplatnitelnost anaerobní digesce při čištění odpadních vod, jakož i při získávání bioplynu [9]. Roku 1897 bylo v Bombaji postaveno první zařízení, v němž byl plyn využit ke svícení a od roku 1907 také pro výrobu elektrického proudu. Kalový technik Imhoff v roce 1906 postavil v Porůří dvoustupňovou anaerobní cističku odpadních vod. Roku 1947 Imhoff upozornil, že z chlévské mrvy od jedné

krávy lze vyrobit stokrát více plynu než z usazenin odpadních vod vyprodukovaných jedním obyvatelem města. Na univerzitě v Darmstadtu bylo roku 1947 vyvinuto anaerobní bioplynové zařízení s horizontálním fermentorem. Během "ropné vlny" v letech 1955 – 1972 došlo k uzavírání bioplynových stanic z důvodu dostupnosti levného topného oleje. Ropná krize 1972 – 1973 zapříčinila opětovné nastartování vývoje a výstavby bioplynových stanic.

Anaerobní čistírenské procesy jsou dodnes nenahraditelnou technologií. V současnosti je pro tyto účely zdokonalována technologie membránových bioreaktorů (MBR), což jsou systémy integrující biologickou degradaci odpadních látek s filtrací pomocí membrán. Tyto druhy bioreaktorů byly prokázány jako velice efektivní při odstraňování organických i anorganických kontaminantů a rovněž biologických entit z odpadní vody zejména v zemědělství. Průmyslová odvětví jako jsou jatka, masozpracující podniky, mlékárny, zpracovny vajec, brambor a rajčat, výroby lihovin, aj. se mohou při využití anaerobních membránových bioreaktorů stát producenty vody o velmi dobré úrovni čistoty pro opětné použití. Také efektivní odstranění dusičnanů, herbicidů, pesticidů a endokrinních přerušovačů separace může být dosaženo právě pomocí technologie membránových bioreaktorů [10]. V této práci pohlížím na anaerobní digesci zejména jako na zdroj energeticky bohatého bioplynu a potenciálně uplatnitelného hnojiva.

3.2 Teoretické základy procesu

Do dnešní doby nejsou jednotlivé dílčí stupně anaerobních procesů zcela prozkoumány. Postupem času byly vytvořeny tři teoretické modely, popisující hlavní fáze rozkladu organické hmoty v prostředí zamezujícím přístupu vzdušného kyslíku.

Nejstarší model předpokládal průběh procesu ve dvou úzce souvisejících fázích. Ve *fázi acidogenní* jsou organické látky reagujícího substrátu (celulózy, ligniny, bílkoviny aj.) štěpeny a přeměňovány acidogenními bakteriemi (acidogeny) za přítomnosti enzymů (jednoduchých bílkovin majících katalytické účinky) na řadu organických kyselin zejména mastné řady. Následně ve *fázi metanogenní* jsou tyto kyseliny opět enzymaticky štěpeny metanogenními bakteriemi na metan, oxid uhličitý a v menší míře na amoniak a sirovodík. Tyto bakterie jsou rovněž schopny k produkci metanu využít přítomný oxid uhličitý a vodík [11].

Později nabyl na významu model třífázový, popsáný Mackem a Bryantem [8]. Proces začíná *první - fermentační fází*, ve které je organický substrát mikroorganismy přeměňován na alkoholy, mastné kyseliny, oxid uhličitý a čpavek. Fermentace může probíhat anaerobně i aerobně. Ve *druhé fázi* se uplatňují bakterie, které produkty fermentace rozkládají především na vodík, oxid uhličitý, acetáty a nižší mastné kyseliny. Ve *třetí fázi* metanogenní bakterie syntetizují metan a mikrobiální biomasu z vodíku, oxidu uhličitého a acetátů.

Nejnovější model dělí proces anaerobní digesce na čtyři fáze, neboť se na něm podílí čtyři hlavní skupiny mikroorganismů [12]:

1. **fáze – hydrolyza**: Přítomné fermentační bakterie produkují extracelulární hydrolytické enzymy, jimiž štěpí makromolekulární organické látky na nízkomolekulární sloučeniny, jako např. vyšší (zejména mastné) kyseliny, aminokyseliny, kyselinu octovou, vyšší alkoholy, jednoduché cukry, vodík, oxid uhličitý, vodu a jiné jednoduhlíkaté sloučeniny. Vzniklé nízkomolekulární sloučeniny jsou již schopny transportu dovnitř buňky. Jedním z nejdůležitějších

produktů této fáze i celého procesu digesce je kyselina propionová [13]. Hydrolýza se u některých substrátů může stát limitujícím dějem pro rychlost procesu tvorby metanu [14]. Některé druhy materiálů je zvláště výhodné podrobit hydrolýze v samostatném stupni.

2. **fáze - acidogeneze**: Acidogenní bakterie přeměňují zejména vyšší kyseliny a alkoholy na ještě jednodušší redukované produkty. Při nízkém parciálním tlaku vodíku se tvoří kyselina octová, vodík, oxid uhličitý, ale při vyšším parciálním tlaku vodíku se tvoří vyšší kyseliny, kyselina mléčná, etanol, atd. Oxid uhličitý rychle z kapalné fáze vypadává ve formě hydrogenuhlíčitanů.

3. **fáze – acetogeneze (anaerobní oxidace)**: Jedno i více-uhlíkaté organické produkty předchozích fází (zejména kyselina propionová) jsou syntrofními acetogenními mikroorganismy oxidovány na kyselinu octovou za současného uvolňování vodíku a oxidu uhličitého. Zároveň homoacetogenní mikroorganismy tvoří kyselinu octovou respirací přítomného oxidu uhličitého a vodíku. Oxidovány jsou i sloučeniny aromatické. Pro acetogenní mikroorganismy je nezbytná těsná spolupráce s dalšími skupinami mikroorganismů (metanogenních, sulfátredukujících, aj.), které spotřebovávají jimi tvořený vodík. Přbytek vodíku v systému totiž inhibuje činnost těchto acetogenních mikroorganismů a tím i produkci metanogenních substrátů [15].

4. **fáze – metanogeneze**: Metanogenní mikroorganismy, jež jsou nejvyšší trofickou skupinou v systému, rozkládají některé jednouhlíkaté látky (metanol, kyselinu mravenčí, metylaminy, aj.), z víceuhlíkatých jsou schopny rozložit pouze kyselinu octovou. Zároveň spotřebovávají vodík a oxid uhličitý. Jejich produktem jsou metan a oxid uhličitý. Tyto mikroorganismy mají zvláště specifické požadavky na životní podmínky a proto se často stávají limitujícím faktorem procesu anaerobní digesce [12].

Dle nároků na substrát lze metanogenní bakterie rozdělit do tří významných skupin [16]:

1. Acetotrofní metanogenní bakterie rozkládající kyselinu octovou produkují největší podíl metanu a také oxid uhličitý. Díky přeměně kyseliny octové na oxid uhličitý jsou tyto kmeny schopny udržovat pH systému v příznivých mezích. Jejich růst je ovšem pomalejší.
2. Hydrogenotrofní metanogenní bakterie spotřebovávají vodík a oxid uhličitý za vzniku metanu. Při zdárném průběhu anaerobní digesce tyto bakterie odstraňují téměř všechny vznikající vodík a proto akumulace vodíku v bioplynu indikuje nedostatek těchto bakterií nebo přetížení anaerobního reaktoru.
3. Obojetné metanogenní bakterie.

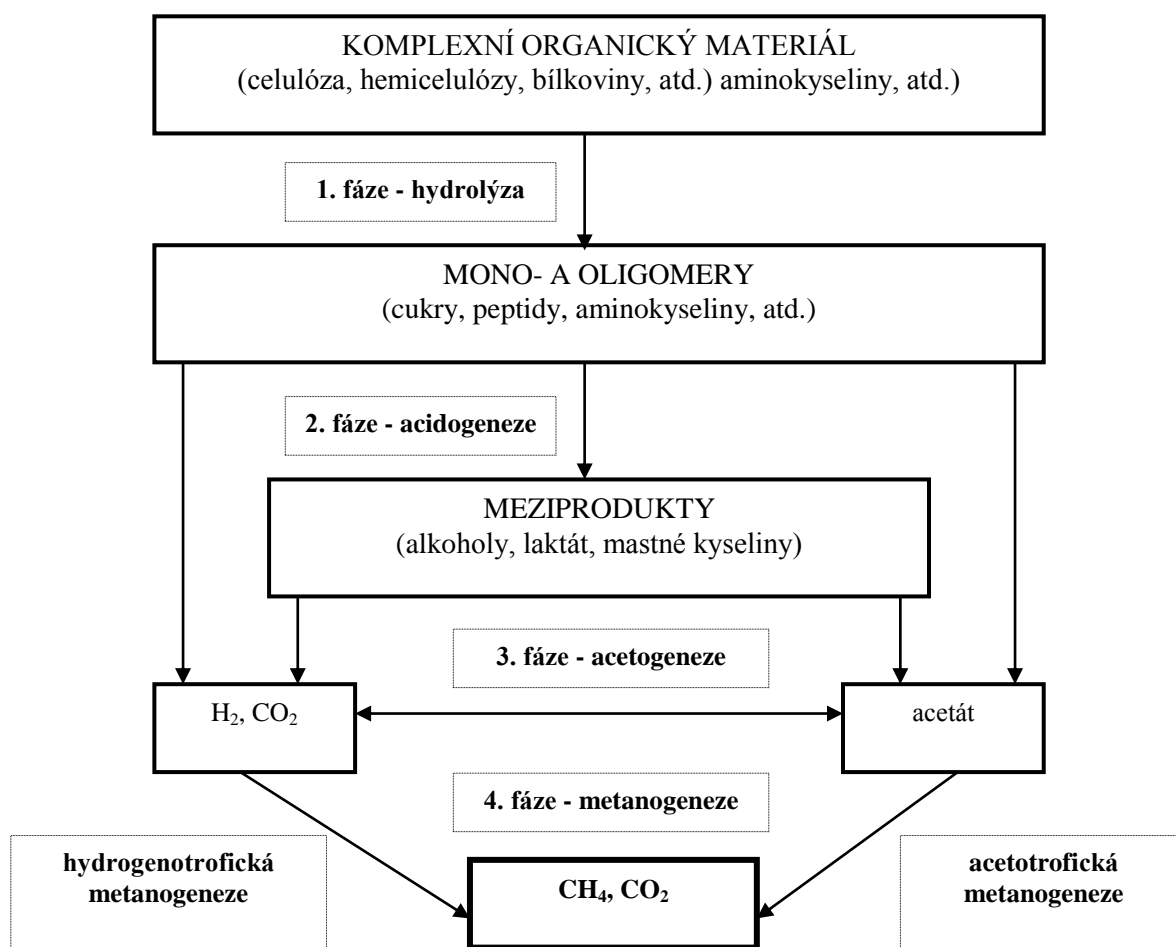
Při anaerobním rozkladu organické hmoty jsou důležité ještě další dvě skupiny mikroorganismů: desulfurační bakterie a denitrifikační bakterie. Tyto organismy jsou schopny žít na víceuhlíkatém substrátu a využívají sírany resp. dusičnany jako akceptory elektronů, přičemž produkují kyselinu octovou, vodík a sirovodík resp. amoniak [17].

Sulfátredukující a denitrifikační mikroorganismy jsou přítomny při anaerobním procesu v mnohem menší míře než mikroorganismy acidogenní a metanogenní. Rostou na víceuhlíkatých substrátech a využívají sírany a dusičnany jako akceptory elektronů pro tvorbu vodíku,

sirovodíku a amoniaku. Při vyšších koncentracích akceptorů mohou tyto mikroorganismy částečně inhibovat metanogeneze [18].

Při kontinuálních dodávkách organické hmoty, jak je tomu u většiny bioplynových stanic, probíhají všechny rozkladné procesy a syntézy současně (produkty jedné skupiny mikroorganismů se ihned stávají substrátem skupiny druhé) a nejsou odděleny ani místně. Jedním z nejdůležitějších momentů produkce metanu je přenos vodíku mezi acetogenními a metanogenními bakteriemi. Tyto dvě skupiny bakterií ovšem potřebují rozdílné optimální podmínky pro správnou kinetiku svého růstu a mají rozdílné nutriční požadavky [19].

Jednoduchá schémata anaerobního procesu navržená různými autory [12], [17] jsou uvedena na obrázcích 1 a 2.



Obr. 1: Dílčí fáze procesu anaerobní digesce [17]

Literatura [20] uvádí přibližnou formuli (1) pro rozklad organických látek:

$$C_xH_yO_z = (X/2 + Y/8 - Z/4) CH_4 + (X/2 - Y/8 + Z/4) CO_2 \quad (1)$$

Podle uvedeného vztahu je na metan přeměněno 50 % hm. sacharidů (746 l/kg), 71 % hm. tuků (1434 l/kg) a 60 % hm. bílkovin (636 l/kg). Tabulka 1 uvádí anaerobní rozklad složek substrátu dle [4].

Tabulka č. 1: **Anaerobní rozklad složek substrátu** [4]

Složka substrátu	Produkce bioplynu [l/kg]	Obsah metanu v bioplynu [% hm.]	Produkce metanu [l/kg]
popeloviny	0	0	0
sacharidy	800	50	400
tuky	1200	67	800
bílkoviny	700	70	500

Obecně nejvyšší schopnost anaerobně podléhat rozkladu a rovněž nejvyšší produkci metanu vykazují jednoznačně tuky, nejnižší schopnost rozkladu za anaerobních podmínek mají sacharidy.

3.3 Faktory ovlivňující průběh procesu anaerobní digesce

Hlavní faktory, jež ovlivňují průběh procesu, lze rozdělit do několika skupin:

1. Přímé faktory

a) Materiálové faktory

- Chemické složení substrátu (obsah celkové sušiny, obsah organické sušiny, poměr prvků C, N, P, přítomnost toxických látek, přítomnost inokula, pH).
- Fyzikální parametry substrátu (viskozita substrátu, měrná hmotnost).

b) Reakční podmínky

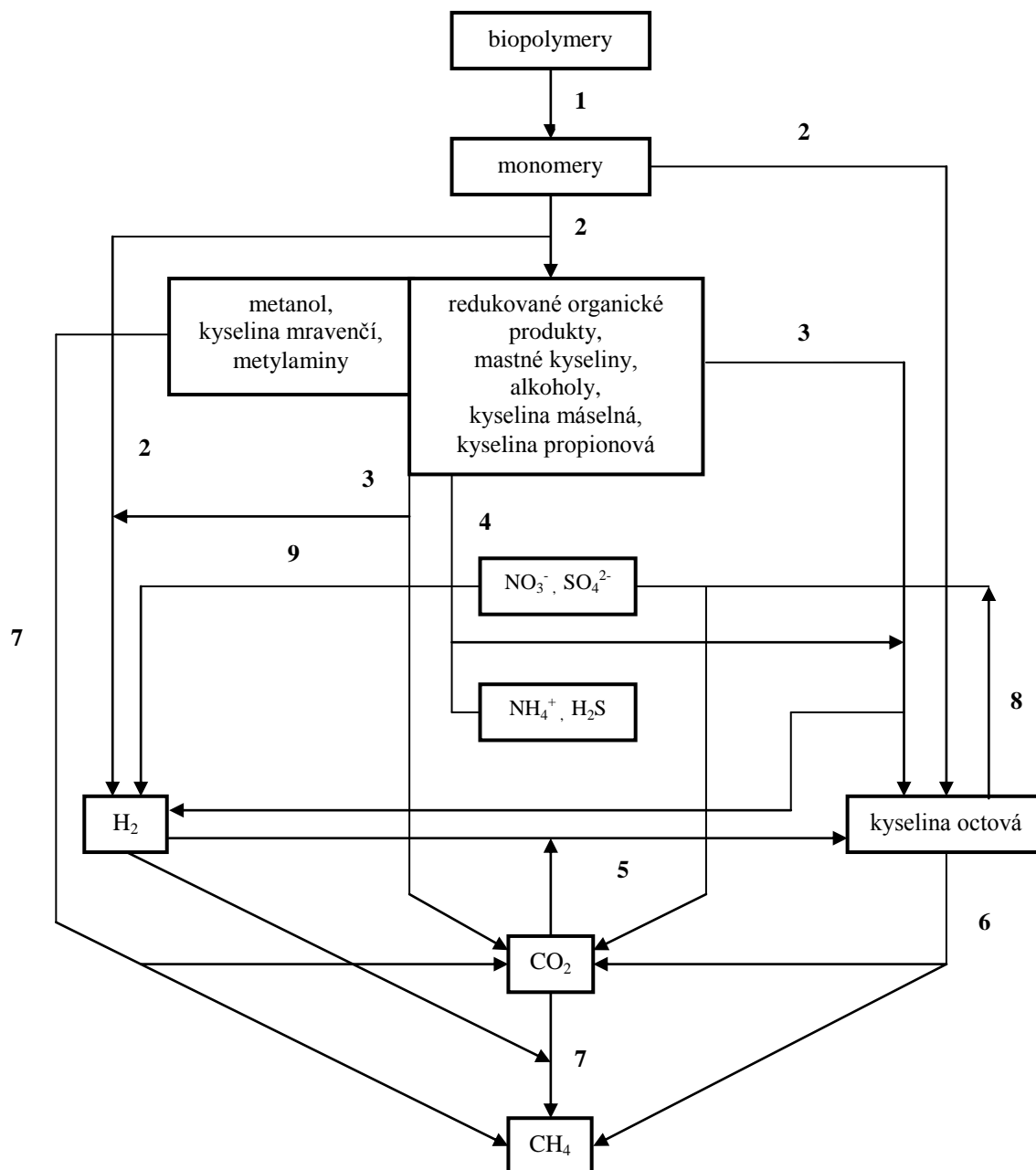
- Reakční teplota, tlak, nepřístup světla, rovnoměrnost dávkování substrátu, dokonalost míchání (homogenizace), poměr výšky a průměru bioreaktoru.

2. Nepřímé faktory

- Logistické podmínky bioplynové stanice (produkce či dovoz základního substrátu – kejdy či mrvy, harmonogram dovozu k substrátů, konstrukčním provedení skladů, jímek a čerpadel).
- Legislativní požadavky na provoz bioplynové stanice, požadavky na kvalitu výstupního kapalného produktu (digestátu).

Uvedené faktory jsou navzájem úzce svázány a vzájemně se ovlivňují a není proto možné je zásadně oddělovat. Je třeba ověřit, do jaké míry každý z těchto faktorů ovlivňuje samotný proces anaerobní digesce. Teprve na základě těchto znalostí je možno optimalizovat tvorbu směsí anaerobně zpracovávaných materiálů. Proces optimalizace na základě více kritérií je poměrně složitý děj a neobejde se bez počítačové podpory.

Všechny hlavní **materiálové faktory** jsou podrobněji níže diskutovány. Při návrhu možnosti zpracování organického materiálu (odpadu) je nutné uvažovat i se změnou jeho složení v čase, která může být zapříčiněna v případě průmyslového odpadu například změnou technologie výroby anebo změnou vstupní suroviny, v případě biologického podílu komunálního odpadu změnou spotřebitelských požadavků obyvatelstva. Takové změny přináší i změnu chemických parametrů a proto je nutné proces fermentace stejného druhu odpadu průběžně vyhodnocovat. Žádoucím stavem je zpracovávání odpadu, který vzniká stejnou technologií za neměnných podmínek. V důsledku sezónnosti může citelně kolísat obsah vody přítomné v materiálu, kdy v letních měsících její podíl narůstá.



- 1 – hydrolýza organických polymerů (polysacharidy, bílkoviny, tuky) na jednotlivé monomery (monosacharidy, aminokyseliny, mastné kyseliny, glycerol aj.),
- 2 – acidogeneze – přeměna organických monomerů na vodík, oxid uhličitý, kyselinu máselnou, propionovou, octovou, mléčnou, etanol aj.,
- 3 – acetogeneze – oxidace redukovaných organických produktů na vodík, oxid uhličitý a kyselinu octovou acetogenními mikroorganismy,
- 4 – oxidace redukovaných organických produktů na oxid uhličitý a kyselinu octovou denitrifikačními a sulfátredukujícími bakteriemi,
- 5 – acetogenní respirace oxidu uhličitého a vodíku homoacetogenními mikroorganismy,
- 6 – metanogeneze z kyseliny octové acetotrofními metanogenními mikroorganismy,
- 7 – metanogeneze z jednonuhlíkatých substrátů, oxidu uhličitého a vodíku hydrogenotrofními metanogenními mikroorganismy,
- 8 – oxidace kyseliny octové na oxid uhličitý denitrifikačními a sulfátredukujícími bakteriemi,
- 9 – oxidace vodíku denitrifikačními a sulfátredukujícími bakteriemi.

Obr. 2: Podrobnější schéma anaerobního rozkladu organických látek [12]

Důležité je rovněž **konstrukční uspořádání** bioreaktoru (závislé na druhu zpracovávaného substrátu). Nezbytnou podmínkou pro plynulý proces digesce je homogenní teplotní pole ve fermentačním prostoru, které by se mělo s časem měnit minimálně. Pokud teplota poklesne, počátek rozkladu čerstvě dodaného materiálu bude opožděn a rovněž stupeň rozkladu veškerého materiálu bude snížen. Může nastat lokální kumulace vodíku a nežádoucí tvorba mastných kyselin, jejichž následný rozklad je problematický. K výskytu problému kumulace vodíku a mastných kyselin může postačovat nedostatečné promíchávání v bioreaktoru. Je tedy nutné zaručit tepelnou homogenitu náplně bioreaktoru a rovněž co nejmenší ztráty tepla do okolí.

Legislativní a logistické požadavky jsou nepřímé faktory, které ovlivňují zejména skladbu vstupní směsi. Zásadním činitelem ovlivňujícím chod bioplynové stanice je logistika. To znamená důležitost zohlednění možné dostupnosti daného vstupního materiálu v daný čas a v potřebném množství. Proces anaerobní digesce je tedy dále ovlivněn velikostí a systémovým řešením případného skladu zpracovávaných materiálů. Možnost skladování většího množství různých materiálů dává širší možnost výběru při sestavování vsázky pro bioreaktory. Systém dovozu materiálů „just in time“ neposkytuje dostatečnou volnost při sestavování vsázky a omezuje její optimalizaci. Při výběru materiálu jako komponenty pro vsázku je dalším řídicím kritériem doba, po kterou materiál může být u provozovatele bioplynové stanice uskladněn. Je celá řada organických materiálů (odpadů), které na základě svých vlastností (infekčnost, náchylnost k rozkladným procesům atd.) a technické úrovně uskladnění není vhodné anebo je legislativně zakázané skladovat delší dobu, po uplynutí které by materiál začal představovat riziko pro obsluhu zařízení anebo pro obyvatelstvo. Také není vhodné, aby materiál, byť nepředstavující riziko, zůstával dlouhodobě na skladě bioplynové stanice z důvodu jeho zhoršujících se vlastností ve vztahu k fermentaci.

Přestože proces anaerobní digesce závisí na přítomnosti mnoha odlišných druhů mikroorganismů (a je dnes známo nejméně 10 druhů *methanococcus* a *methanobacterius*), které vyžadují rozdílné životní podmínky a rozdílnou péči, lze obecně vymezit vliv následujících faktorů:

Vlhkost prostředí

Obsah vody v anaerobně rozkládaném substrátu je nutný. Zejména metanogenní bakterie se mohou úspěšně množit a spotřebovávat organický podíl substrátu pouze při alespoň 50 %-ní vlhkosti substrátu. Vlhkost je vyjadřována obsahem celkové sušiny v hmotnostních procentech. Čím více bioplynu vznikne, tím více organické sušiny je odbouráno. Odbouráváním organického podílu se během fermentace vlhkost zpracovávané hmoty zvyšuje, ale vlhkost výstupního fermentovaného materiálu může být i nižší než vlhkost vstupního substrátu, neboť část vody odchází v bioplynu a narůstá anaerobní biomasa [21].

Nepřístup vzduchu

Striktně anaerobní prostředí potřebují bakterie metanogenní, na rozdíl od bakterií acidogenních, jež snášejí i nízké koncentrace kyslíku. Kyslík je pro metanogenní kmeny bakterií toxický již od koncentrací cca 0,001 % obj., proto je jeho přítomnosti nezbytné zabránit především v poslední fázi anaerobního procesu [22].

Stálost teploty substrátu

Rychlost procesu vyhnívání je na teplotě velmi závislá. Čím je teplota v reakčním prostoru vyšší, tím rychlejší je anaerobní rozklad a tím vyšší je produkce bioplynu. Se stoupající teplotou se zkracuje doba vyhnívání, ale klesá obsah metanu v bioplynu. Čím je teplota vyšší, tím více jsou bakterie citlivé na teplotní výkyvy. Metanogenní bakterie (podle typu kmenu) jsou schopny pracovat v rozmezí teplot 0 °C až 70 °C [22].

Pro technickou praxi výroby bioplynu jsou významné mikroorganismy pracující zejména v rozmezí 20 °C až 60 °C. Dosavadní zkušenosti ukázaly tři neoptimálnější teplotní oblasti, v nichž účinně pracují určité kmeny bakterií:

- psychrofilní kmeny (0 °C až 20 °C);
- mezofilní kmeny (25 °C až 30 °C);
- termofilní kmeny (více než 45 °C).

V závislosti na povaze kofermentovaných materiálů a konstrukci bioreaktorů lze volit i jiná teplotní pásma, ale vždy je účelné udržovat teplotu substrátu na přibližně konstantní hodnotě. Zvláště nepříznivě působí náhlé krátkodobé poklesy teploty. Přitom termofilní kmeny jsou velmi citlivé na náhlé krátkodobé vzrůsty teploty. Zatímco pro mezofilní kmeny mohou být výkyvy 2 až 3 °C snesitelné a například rozmezí 36 až 39 °C se jeví jako optimální, termofilní bakterie by neměly být vystaveny náhlým výkyvům větším než 1 °C [23]. Při poklesu teploty se zpomalí činnost metanogenů více než činnost acidogenů. Všechny kmeny jsou schopny adaptace na nové teplotní podmínky v horizontu maximálně jednoho měsíce [24], [25]. S rostoucí teplotou se může obsah metanu v bioplynu i snížit, neboť se snižuje rozpustnost oxidu uhličitého v substrátu.

Doba zdržení v bioreaktoru

Doba zdržení substrátu v reakčním prostoru závisí na obsahu organické sušiny. Například optimální doba zdržení při mezofilní fermentaci prasečí kejdy je 30 dnů, u hovězí kejdy 35 dnů a u drůbežího trusu až 40 dnů.

Složení substrátu

Metanogenní bakterie nemohou rozkládat organické látky substrátu (tuky, sacharidy, bílkoviny, celulózy a ligniny) v čisté formě, neboť zároveň potřebují dusíkaté látky, minerály a stopové prvky. Relativně vyvážený poměr těchto látek je vždy možno očekávat ve hnoji či kejdě, které jsou proto doporučovány jako základní substrát pro kofermentaci. Substrát by měl mít alespoň 60 % hm. organických látek v sušině. Při anaerobních procesech přechází asi 95 % uhlíku ze substrátu do bioplynu a 5 % do vytvářené anaerobní biomasy. Substrát musí mít vyvážený poměr celkového organického uhlíku (TOC), makronutrientů (N, P) a mikronutrientů (Na, K, Ca, ...), přičemž pro počáteční stádium procesu je dále vhodný poměr CHSK:N:P v rozmezí od 300:6,7:1 do 500:6,7:1. Příliš vysoký či nízký poměr prvků negativně ovlivňuje tvorbu a výtěžnost bioplynu. Inhibiční vliv dusíku se může významně projevit už při koncentracích volné/amoniakální formy dusíku (N_{NH_4}) ve fermentoru ≥ 3 g/l [26].

Nejvýznamnější mikronutrienty Na, K, Ca, Mg, Fe, S, Ni, Co, Mo, Se, W jsou zapojeny do enzymatických procesů acetogenních a metanogenních mikroorganismů. Jejich příznivé rozsahy koncentrací nejsou dosud stanoveny, jedná se většinou o stopová množství. Mikronutrienty se ve vyšších koncentracích stávají inhibitory biologických procesů, přestože je nelze považovat za jednoznačně toxické [13].

Rovnoměrnost přísunu substrátu

Pokud je proces anaerobní digesce veden kontinuálně (mokrý procesy), je rovnoměrný přísun substrátu (rovnoměrný přísun organických látek) nutností k udržení stability procesu a konstantní produkce bioplynu o přibližně konstantním obsahu metanu. Doba zdržení fermentované hmoty v reakčním prostoru by měla být v čase neměnná. S rovnoměrností přísunu substrátu souvisí parametr **zátížení bioreaktoru**, který udává, jaké maximální množství organické sušiny (oTS) je možno dodat do 1 m³ pracovního prostoru bioreaktoru za jeden den, aniž by došlo k “překrmení” mikroorganismů a zastavení procesu digesce. Obvyklé zatížení anaerobního bioreaktoru při teplotě 35 °C je 0,5 až 1,5 kg oTS/m³.den. Maximální možné hodnoty se pohybují mezi 3 až 5 kg oTS/m³.den [9].

Uvolnění buněčného lyzátu

Uvolnění obsahu buněk mikroorganismů přítomných v substrátu do celého objemu anaerobně zpracovávané vsázky lze urychlit fyzikálním nebo enzymatickým rozrušením buněčných stěn. Buněčný lyzát působí stimulačně na činnost a růst fermentačních mikroorganismů [13].

Přítomnost toxických látek

Toxické koncentrace látek či prvků působících na mikroorganismy se vzájemně velmi liší. Výše toxické koncentrace závisí na způsobu dávkování, přítomnosti případného detoxikantu a zejména na fyziologickém stavu biomasy. Dlouhá doba zdržení biomasy umožňuje adaptaci mikroorganismů na počáteční toxické koncentrace některých látek. Jako významně toxicky působící látky jsou uváděny “těžké kovy” (Cu, Pb, Cr, Zn), sulfidy, kyanidy, molekulární kyslík, peroxidy aj. Vhodnost například nevyužitých krmiv pro kofermentace může být snížena nežádoucími příměsemi antibiotik a jiných léčiv, které již byly přimíšeny [27], [28].

pH reakční směsi

Extrémně nízké či vysoké hodnoty koncentrace vodíkových iontů v systému působí na mikroorganismy inhibičně [29]. V počátku anaerobního procesu (při hydrolýze a acidogenezi) je účelné udržovat pH v rozmezí 5,3 až 6,7, metanogeneze vyžaduje hodnoty zásaditější (6,8 až 7,2) [30]. Většině mikroorganismů vyhovuje přibližně neutrální pH v rozmezí 6,2 až 7,8. Obecně je doporučována mírně kyselá keжда [9]. Na koncentraci vodíkových iontů závisí také míra disociace některých chemických látek (amoniak, sirovodík, fosfan, nižší mastné kyseliny), jejichž nedisociovaná forma inhibuje činnost mikroorganismů. U kyselých substrátů jako je např. siláž je nutné do procesu dodávat vápno [31].

Z chemického hlediska je hodnota pH určována zejména dynamickou rovnováhou mezi tvorbou mastných kyselin acidogenními mikroorganismy a jejich spotřebou metanogenními mikroorganismy. Z hlediska fyzikálního závisí pH na protolytické (zejména uhličitánové)

rovnováže, udávající pufrovací kapacitu systému. Digestát z kejdy by měl mít mírně zásadité pH [9].

Organickou hmotu vhodnou pro anaerobní fermentaci dělíme dle hodnoty pH na:

a) Kyselou:

- senáž
- kukuřičná siláž
- travní hmota
- slepičí a krůtí trus
- čerstvý bioodpad

b) Neutrální:

- hovězí hnůj
- prasečí hnůj
- hovězí kejda
- prasečí kejda (omezeně)
- starý bioodpad

Poměr C:N a C:P

Parametr C:N souvisí do jisté míry s kyselostí či neutralitou substrátu. Z tohoto pohledu je nutné při přípravě substrátu optimalizovat poměr na rozmezí C:N (20 až 35:1), v literatuře [19] se uvádí poměr C:N v rozmezí 10 až 45:1. Jako limitní je udáván poměr prvků C:N:P = 100:1:0,2. Příliš nízký či příliš vysoký poměr C:N negativně ovlivňuje tvorbu a výtěžnost bioplynu. Nízké hodnoty znamenají riziko nadměrné tvorby amoniaku, vysoké hodnoty znamenají riziko vzniku organických kyselin, snížené využití uhlíku a sníženou produkci metanu. Například sklizenou fytomasu ze zemědělské půdy je výhodné zpracovávat kofermentací s prasečí kejdou nebo kafilénními odpady a zajistit tak vhodný poměr C:N. V tabulce 2 jsou uvedeny poměry C:N některých kofermentovatelných materiálů [9]. Poměr C:P je účelné udržovat na hodnotě cca 200:1 [19].

Tabulka č. 2: **Poměr obsahu uhlíku a dusíku v některých fermentovatelných materiálech [9]**

Druh materiálu	C:N
kůra	120:1
piliny	500:1
papír, karton	350 až 1000:1
kuchyňský odpad	12 až 20:1
odpad ze zeleniny	13:01
posečená tráva	12 až 25:1
odpad ze zahrad	20 až 60:1
listí	30 až 60:1
dřevěné štěpky	100 až 150:1
drůbeží trus	10:1
močůvka	2:1
kejda skotu	10:1
sláma, obilí	60 až 100:1

Míchání suspenze v bioreaktoru

Míchání suspenze v bioreaktorech zajišťuje:

- 1) důkladné odplynování substrátu a přívod čerstvých živin bakteriím,
- 2) udržení co nejrovnoměrnejší teploty,
- 3) zabránění vzniku plovoucích přikrovnů.

Míchání je možné všemi běžnými prostředky, nejčastěji je zajištěno míchadlem u dna bioreaktoru nebo cirkulací suspenze mezi tepelným výměníkem a bioreaktorem. K míchání přispívá i unikající bioplyn, tvořící drobné bubliny. Při nízkých obsazích sušiny v substrátu je míchání unikajícím bioplynem postačující. Účinnější míchání se provádí recirkulací bioplynu [32], [33].

Množství vodíku v systému

Jelikož vodík je zapojen do mnoha reakcí na různých stupních anaerobního rozkladu, je právě on nejdůležitějším regulačním faktorem. Pro nejvyšší rychlost anaerobního rozkladu je nutné udržení dynamické rovnováhy mezi produkcí a spotřebou vodíku v systému. Nadbytek vodíku způsobuje tvorbu nesnadno metabolizovatelné kyseliny propionové, která se pak hromadí v systému a zpomalí celý proces digesce [26]. Výskyt vodíku v bioplynu je nejrychlejší odezvou na negativní změnu podmínek fermentace, neboť je velice málo rozpustný ve vodě. Při optimálních podmínkách se vodík v bioplynu vyskytuje v množství stopovém, zvýšené množství vodíku v bioplynu prakticky vždy indikuje nestabilitu procesu [27].

Množství nižších mastných kyselin v systému

Tento parametr je dalším z nejcitlivějších indikátorů stability procesu fermentace. Zvýšení koncentrace kyseliny octové, propionové a máselné ukazuje, že došlo k zásadní změně některé z podmínek jako je teplota, zatížení, doba zdržení. Kontrola obsahu mastných kyselin na výstupu z bioreaktoru by měla být prováděna především po jakýchkoliv náhlých změnách provedených na vstupu. Doporučovaná hodnota koncentrace těkavých mastných kyselin při zapracování bioreaktoru je 6 až 16 mmol/l. Při zvýšení teploty fermentace nad 30 °C jsou přítomné nižší mastné kyseliny rychle spotřebovány za vzniku metanu [28], [29], [30].

Viskozita reakční směsi

Zvýšení viskozity směsi vlivem poklesu teploty způsobuje při mokré fermentaci zhoršenou separovatelnost tuhých částic a vyšší energetické nároky na míchání, sníží se ovšem riziko flotace tuhých částic vznikajícím bioplynem. Tyto tuhé částice mohou vytvářet “kalový strop” a zabránovat vyprázdňování bioreaktoru [14].

Objemová struktura resp. měrná hmotnost substrátu

Tyto parametry jsou důležité zejména při suché fermentaci pro zamezení tvorby inhibičních látek, které negativně ovlivňují životní cyklus mikroorganismů (např. amoniak) a vytvoření prostorů k odvětrání bioplynu z biomasy a jeho kumulaci v horní části reaktoru. V případě potřeby úprav objemové struktury resp. měrné hmotnosti substrátu lze jako strukturní materiál použít slámu nebo řezanku. Objemová struktura ovlivňuje hloubku biologických procesů v profilu biomasy, neboť proces lépe probíhá na velkých kontaktních plochách [9].

Disociace amoniaku

Rovnováze disociované a nedisociované formy amoniaku v biologických systémech zejména anaerobních procesů odpovídá disociační konstanta $K = 1,78 \times 10^{-5}$ (při 20 °C).

Disociace sirovodíku

Sirovodík a sulfidy, vznikající biologickou redukcí sulfátů, působí problémy svou toxicitou pro mikroorganismy a zápachem. Při pH nižším než 8,0 převládá nedisociovaná forma H_2S a problémy se zápachem jsou výraznější [31].

Uhličitánová rovnováha

Některé materiály jako např. splaškové vody, čistírenské kaly a materiály uvolňující při rozkladu amoniak mají výhodné složení z hlediska udržení konstantního pH v průběhu anaerobního rozkladu. Mají pufrovací kapacitu danou především uhličitánovou rovnováhou mezi CO_2 a HCO_3^- , přičemž převažujícím kationem způsobujícím alkalitu je kation NH_4^+ [32].

Optimální poměr průměr/výška bioreaktoru

Tento poměr je důležitý pro zajištění rovnoměrného ohřevu substrátu a tím i aktivity mikroorganismů. V literatuře se uvádí rozdílné empirické hodnoty, které závisí na druhu fermentované biomasy a použité fermentační metodě.

Nepřístup světla

Světlo zpomaluje životní procesy většiny přítomných mikroorganismů a tím i proces anaerobní digesce. Splnění tohoto parametru nečiní v praxi problém.

Dávkování inokula

Dávkováním funkční anaerobní biomasy se širokou škálou mikroorganismů (inokula) je možno ovlivňovat zatížení bioreaktoru. Pro zapracování nového bioreaktoru je kvalita a kvantita inokula klíčovým problémem. Nejlepším zdrojem inokula je bioreaktor, zpracovávající stejný substrát za stejných podmínek. Fáze adaptace inokula pak odpadá. V případě zpracovávání prasečí a zejména hovězí kejdy není inokulum většinou potřeba, neboť tyto suroviny již obsahují mnoho různých methanogenních organismů [33].

Tlak v bioreaktoru

Vliv tlaku nebyl předmětem rozsáhlejších výzkumů. Aplikační výzkum však ověřil vysokou tolerantnost metanogenů vůči tlaku [34].

3.4 Biomasa vhodná pro výrobu bioplynu

Biomasa je hmota živočišného nebo rostlinného původu, obsahující převážně organické látky. Teoretické odhady různých odborníků uvádějí roční celosvětovou produkci biomasy na úrovni 100 miliard tun, jejíž energetický potenciál se pohybuje kolem 1400 EJ. To je téměř pětikrát více, než činí roční světová spotřeba fosilních paliv 300 EJ [31]. Nejzákladnější představu o tom, zda daná biomasa je vhodná pro zpracování anaerobní fermentací si vytvoříme ze znalosti její vlhkosti a poměru C:N. Materiály s vlhkostí nad 45 % hm. a s poměrem C:N pod přibližně 30:1 jsou vhodné pro anaerobní fermentaci [35].

Základní druhy biomasy, běžně využívané pro anaerobní výrobu bioplynu jsou:

- 1) exkrementy hospodářských zvířat (statková hnojiva – prasečí kejda a hnůj, hovězí kejda a hnůj, drůbeží trus a podestýlka, hnůj, močůvka, hnojůvka, podestýlka, aj.);

- 2) fytomasa - senáže, siláže, části a kořeny rostlin, vybrané druhy energetických rostlin, ekonomicky neprodejné produkty (např. nezkrmená kukuřice, obilniny a šťovík);
- 3) odpady ze zpracovatelského a potravinářského průmyslu a odpady z kuchyní a jídelen;
- 4) specifické a speciální odpady (odpady z jatek, termicky upravené živočišné zbytky jako např. masokostní moučka, kafilární tuk;
- 5) tříděné domovní a komunální odpady (biofrakce respektive biologicky rozložitelný komunální odpad).
- 6) průmyslový bioodpad (kaly z dřevozpracujícího průmyslu, ...);
- 7) kaly z čističek odpadních vod;
- 8) jiné organické odpady (odpady ze zahradnictví, lesnictví, myslivosti, rybářství...).

Základní druhy biomasy, jež jsou používány pro anaerobní digestci jsou zmíněny podrobněji.

3.4.1 Statková hnojiva

Materiály jako hnůj, hnojůvka, močůvka, kejda, sláma, jakož i jiné zbytky rostlinného původu a další vedlejší produkty vzniklé při chovu hospodářských zvířat zejména v zemědělské prvovýrobě, jsou podle paragrafu 2 Zákona o hnojivech č. 156/1998 Sb. [36] vykazovány jako statková hnojiva, nejsou-li dále upravovány. Zároveň jsou zvířecí trus, moč a hnůj (mrva včetně znečištěné slámy) a kapalný odpad shromažďovaný odděleně a zpracováván mimo místo vzniku podle paragrafu 3 Zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. [37] odpadem, majícím katalogové číslo 02010600. Existuje tedy paradox, kdy na jedné straně je kejda považována za odpad, na druhé straně je řazena mezi organická hnojiva mající svůj biologický, energetický a ekonomický potenciál, který je nutno využít. Například v roce 2001 činily tyto materiály 53 % produkce všech biologicky rozložitelných odpadů v ČR [38].

Vykazování statkových hnojiv jako odpady je vhodné v případě, kdy nejsou využívána přímo producentem, ale jsou předávána ke zpracování jinému subjektu. Pokud jsou však statková hnojiva na farmě kde vznikají využívána ke hnojivým účelům, tak jejich vykazování dle legislativy odpadů je nadbytečné. V případě, že jsou statková hnojiva předávána k úpravě v zařízení, které vlastní jiný subjekt (např. centrální bioplynové stanice), a po úpravě jsou převzata zpět a využita ke hnojivým účelům, jsou statková hnojiva surovinou pro anaerobní digestci. Výstupem po digestci je digestát, který je dle nové legislativy hnojiv považován rovněž za statkové hnojivo [39]. Porovnání množství vykalů hospodářských zvířat je uvedeno v tabulce 3 a porovnání produktivity bioplynu některých hospodářských zvířat je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka č. 3: Porovnání množství vykalů hospodářských zvířat [11]

Zdroj výkalů	Tuhé výkaly [kg/den/DJ]	Kapalné výkaly [kg/den/DJ]	Poměr tuhé/kapalné
skot	25	12	2 : 1
prase	12	20	1,1 : 1,7
ovce	15	10	1,7 : 1
kůň	15	5	3 : 1

Poznámka: DJ je dobytčí jednotka (500 kg živé váhy).

Tabulka č. 4: **Porovnání produktivity bioplynu u hospodářských zvířat [11]**

Zdroj bioplynu	Produkce bioplynu [m_N^3]	Získaná energie [MJ]
dojnice	600	13200
skok na výkrm	400	8800
prase na výkrm	70	1540
nosnice	5,8	128

Poznámka: Jedná se přibližnou roční produktivitu jednoho kusu zvířete.

Prasečí kejda

Nejvýznamnějším statkovým hnojivem z pohledu mokré anaerobní digesce je prasečí kejda, částečně zkvašená směs tuhých a tekutých výkalů a zbytků krmiv s podílem technologické vody [40]. V kejdě mohou být přítomny látky používané při ustájení jako jsou rezidua dezinfekčních prostředků, léků apod. Kejda je vodný substrát s podílem biologicky rozložitelných organických látek, obsahující všechny potřebné živiny pro metanogenní organismy a bohatě oživený směsnou kulturou mikroorganismů. Zemědělství se potýká s nadprodukcí prasečí kejdy. Jedno prase denně vyprodukuje až 9 kg exkrementů, které jsou převedeny na 40 až 70 kg prasečí kejdy. Využití kejdy pro výrobu bioplynu je více než žádoucí. Prasečí kejda obsahuje podle podmínek v prasečí farmě 3 až 8 % hm. sušiny [41]. Organické látky jsou v sušině zastoupeny ze 70 až 80 % hm. Obsah dusíku v sušině se pohybuje mezi 5 až 6 % hm. Přítomnost metanogenních mikroorganismů nahrává možnosti anaerobního zpracování a umožňuje i ko-fermentaci. Poměr C:N u prasečí kejdy nepřesahuje 7:1. Bioplyn vznikající fermentací z prasečí kejdy o obsahu sušiny 5 % hm. příkladně v bioplynové stanici Kladruby obsahuje přibližně 67 % obj. metanu [42]. Produkce bioplynu z prasečí kejdy je relativně nízká, proto je výhodné ji dopňovat vhodnými kosubstráty. Z 1 VDJ (velká dobytčí jednotka = 500 kg živé porážkové hmotnosti), což je 8 prasat, vznikne za den přibližně 50 l kejdy o celkové sušině cca 7 % hm. a z ní $1,0 \text{ m}_\text{N}^3$ bioplynu (cca 60 % metanu). Z 1 m^3 prasečí kejdy vznikne cca $20 \text{ m}_\text{N}^3/\text{den}$ bioplynu [41].

Hovězí kejda

Hovězí kejda má obsah sušiny značně vyšší než kejda prasečí. Běžně se obsah celkové sušiny pohybuje kolem 8 % hm. a obsah organické sušiny kolem 6 % hm. Hovězí kejda produkuje bioplyn s průměrným obsahem metanu 55 % obj. Měrná produkce bioplynu je 700 až 1000 litrů na 1 kg odbourané organické části sušiny. Anaerobní digesce hovězí kejdy je méně rozšířená než digesce kejdy prasečí mimo jiné proto, že pro chod bioplynové stanice je potřeba zajistit stálý dostatečný objem kejdy a odpovídajících podniků v ČR není mnoho. Z 1 VDJ (1,2 dojnice) vznikne za den 55 l kejdy o celkové sušině cca 8,5 % hm. a z ní $1,5 \text{ m}_\text{N}^3$ bioplynu (cca 60 % obj. metanu). Z 1 m^3 hovězí kejdy vznikne cca $27 \text{ m}_\text{N}^3/\text{den}$ bioplynu [41].

Drůbeží trus

Drůbeží trus je rovněž (méně častým) zdrojem bioplynu. Při použití pro mokrou metodu anaerobní digesce je tento materiál třeba ředit a zvyšovat jeho nízké pH, proto připadá v úvahu spíše pro kofermentaci. Z 1 VDJ (320 nosnic) za den vznikne 123 l kejdy (trusu) a z ní 5 m_N^3 bioplynu (obsah metanu cca 65 % obj.). Z 1 m^3 drůbežího trusu vznikne cca $40,5 \text{ m}_\text{N}^3/\text{den}$

bioplynu [41]. Porovnání roční produkce bioplynu u nosnice a dobytka je uvedeno v tabulce 4. Porovnání vlastností kejdy hospodářských zvířat je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka č. 5: **Porovnání vlastností kejdy hospodářských zvířat [% hm.]**

Zdroj výkalů	Obsah celkové sušiny	Obsah organické sušiny	N	P	K	Ca	Mg
skot	7,7	5,7	0,3	0,06	0,24	0,12	0,03
prase	8,3	6,7	0,61	0,15	0,19	0,18	0,05
drůbež	16,1	11,4	0,1	0,28	0,42	1,1	0,06

3.4.2 Fytomasa

Fytomasa je stále více využívaným kosubstrátem při anaerobní digesti, neboť je relativně dostupná a poskytuje vysoké výtěžky bioplynu. Fermentovatelná je jak čerstvá fytomasa nadzemních částí, případně i kořenů rostlin vybraných druhů záměrně pěstovaných energetických rostlin či ekonomicky neprodejných produktů (např. nezkrmená kukuřice, brambory, obilniny, olejiny, křídlatka, šťovík, chrastice rákosovitá, vrby, topoly, olše, akáty, apod.), tak i silážovaná fytomasa. Ekonomicky výhodné je pro bioplynovou stanici použití travní hmoty. Travní fytomasa má pro výrobu bioplynu v zemědělství výsadní postavení, neboť z dotačně udržované zatravněné zemědělské půdy musí být odstraňována. Senážováním travní fytomasy je možno zabezpečit energeticky bohatý substrát pro biozplynování v zimním období. Tento způsob zpracování vyžaduje značné investiční náklady na vybudování bioplynové stanice, ale je ho možno považovat za perspektivní i v podmínkách ČR.

3.4.3 Odpady ze zpracovatelského a potravinářského průmyslu

Odpady s vysokým obsahem sacharidů, tuků, nebo bílkovin jako jsou odpady z mlékáren (mléčné odpady), cukrovarů (řepné řízky), lihovarů (výpalky), pivovarů (mláto), aj. jsou velmi vhodné pro anaerobní digesti. Přestože potravinářské odpady jsou snadno efektivně využitelné např. jako krmiva či hnojiva a navíc mohou z důvodu obsahu nebezpečných látek znamenat riziko pro uplatnění anaerobního digestátu jako hnojiva, představují tyto odpady určitý potenciál pro zpracování v bioplynových stanicích (jejich zpracování bioplynové stanice mohou zpoplatnit) [43 - 46].

Řepné řízky

Za potenciálně velmi významné kosubstráty pro anaerobní digesti je možno považovat biologicky rozložitelné odpady z cukrovarnického průmyslu. Současné problémy tohoto průmyslového odvětví povedou v blízké budoucnosti k výraznému omezení pěstování cukrové řepy. Jednou z možností, jak udržet tuto významnou plodinu na orné půdě, je právě oblast energetického využití procesem anaerobní digestce. Cukrová řepa je v našich zeměpisných podmínkách nejproduktivnější polní plodinou. Pěstování cukrové řepy znamená velmi efektivní využití půdy, vody a slunečního záření. Řepné řízky jako vedlejší produkt zpracování cukrovky na cukr a bioetanol se stávají v zemích EU významnou druhotnou surovinou. Anaerobním zpracováním řepných řízků v USA se zabývali již Frosttel a Lane v roce 1984 [47, 48]. Na Slovensku ověřovali anaerobní rozložitelnost řepných řízků v laboratorním [49] i poloprodučním měřítku [50]. Obsah celkové sušiny řepných řízků je cca 20 % hm. a po zředění na obsah sušiny

cca 8 % hm. jsou řízky velmi vhodné pro mokrou anaerobní kofermentaci spolu s kejdou. Ligninocelulózové frakce sušených řepných řízků obsahují 20 až 30 % hm. celulózy, 24 až 32 % hm. hemicelulóz (se základní stavební jednotkou - arabinózou), 24 až 32 % hm. pektinových sloučenin a 3 až 4 % hm. ligninu [51]. Látkové složení vyslazených cukrovarnických řepných řízků je uvedeno v tabulce 6.

Tabulka č. 6: **Látkové složení cukrovarnických vyslazených řepných řízků** [51]

Složka	Obsah v celkové sušině [% hm.]
ramnóza	2,4
fukóza	0,2
arabinóza	20,9
xylóza	1,7
manóza	1,1
galaktóza	5,1
glukóza	21,1
kyselina galakturonová	21,1
metanol	1,8
kyselina octová	3,9
kyselina ferulová	0,8
kyselina diferulová	0,04
bílkoviny	11,3
popel	3,3

3.4.4 Specifické a speciální odpady

Do této skupiny patří zejména jateční odpady (konfiskáty, mršiny, ...) a termicky zpracované jateční a podobné odpady – produkty kafilérii označované jako masokostní moučka, rybí moučka a kafilérní tuk. Masokostní moučka se donedávna používala jako vysoce hodnotné krmivo pro hospodářská zvířata (s výjimkou hovězího dobytka) a tuk byl dodáván k dalšímu využití do chemického průmyslu a energetiky. S rozšířením nemoci BSE jinak známé jako "nemoc šílených krav" bylo postupně krmení masokostní moučkou omezováno a v současnosti je téměř zakázáno. Evropská legislativa (Animal By-Products Regulations) nařízením 1774/2002 ES [52] zakázala zkrmování masokostní moučky hospodářskými zvířaty, což zapříčinilo otázku, zda je nutné přepracovávat jateční materiály kategorie 2. a 3. klasickou, energeticky velmi náročnou technologií v kafilériích. Je zřejmé, že se tyto materiály s úspěchem dají využít zpracováním anaerobní bioplynovou technologií (případně s hydrolytickým předstupněm – zároveň hygienizací). Z energetického hlediska se tato alternativa jeví jako neefektivní, vzhledem k předcházející vysoké energetické náročnosti zpracování jatečního odpadu kafilérní technologií. Jako mnohem energeticky vhodnější se jeví použití anaerobní digesce přímo na jateční odpady, ovšem vyvstává již zmíněný problém zajištění dostatečné hygienizace.

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002 [52] definuje vedle masokostní moučky celou řadu vedlejších živočišných produktů zpracovatelných v závodech na výrobu bioplynu:

- *materiály 2. kategorie* zpracované ve schváleném závodě pomocí metody 1 (tepelné zpracování při teplotě nejméně 133 °C po dobu nejméně 20 minut bez přerušení, při absolutním tlaku nejméně 3 bary, přičemž velikost částic nesmí být větší než 50 milimetrů);
- *hnůj a obsah trávicího traktu;*
- *materiály 3. kategorie* za které se považuje:

- a) části poražených zvířat, které jsou v souladu s právními předpisy požitelné, ale z obchodních důvodů nejsou určeny k lidské spotřebě;
- b) části poražených zvířat, které jsou vyřazeny jako nepoživatelné, které ale nevykazují žádné známky onemocnění přenosných na lidi nebo na zvířata a pocházejí z jatečně upravených těl, která jsou v souladu s právními předpisy požitelná;
- c) kůže, kopyta, paznehty, rohy, prasečí štětiny a peří pocházející ze zvířat poražených na jatkách po prohlídce ante-mortem, na jejímž základě byla v souladu s právními předpisy posouzena jako vhodná k porážce k lidské spotřebě;
- d) krev získaná z jiných zvířat než z přežvýkavců; zvířata byla poražena na jatkách po prohlídce ante-mortem, na jejímž základě byla v souladu s právními předpisy posouzena jako vhodná k porážce k lidské spotřebě;
- e) vedlejší živočišné produkty vznikající při výrobě produktů určených k lidské spotřebě, včetně odtučněných kostí a škvarků;
- f) zmetkové potraviny živočišného původu nebo zmetkové potraviny obsahující produkty živočišného původu s výjimkou kuchyňského odpadu, které z obchodních důvodů, z důvodů závady při výrobě nebo balení nebo jiné závady nepředstavují nebezpečí pro lidi nebo zvířata již nejsou určeny k lidské spotřebě;
- g) syrové mléko zvířat, která nevykazují klinické příznaky žádného onemocnění přenosného tímto produktem na lidi nebo na zvířata;
- h) ryby nebo jiní mořští živočichové s výjimkou mořských savců, ulovení ve volném moři za účelem výroby rybí moučky
- i) čerstvé vedlejší produkty z ryb ze závodů vyrábějících rybí produkty k lidské spotřebě;
- j) skořápky, vedlejší produkty z líhní a vedlejší produkty z porušených vajec zvířat, která nevykazovala klinické příznaky žádných onemocnění přenosných prostřednictvím vajec na lidi nebo na zvířata;
- k) krev, kůže, kopyta, paznehty, peří, vlna, rohy, a kožešiny pocházející ze zvířat, která nevykazovala klinické příznaky žádných onemocnění přenosných prostřednictvím těchto produktů na lidi nebo na zvířata;
- l) kuchyňský odpad pocházející z restaurací, stravovacích zařízení a kuchyní, včetně centrálních kuchyní a domácích kuchyní.

Všechny výše jmenované materiály 3. kategorie, stejně jako odpady z potravinářského průmyslu a jídelen, používané jako suroviny pro výrobu bioplynu musí být před fermentací hygienizovány v pasterizačním/sanitačním zařízení. Devitalizují se tak patogenní mikroorganismy a choroboplodné zárodky. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002 [52] jmenuje následující minimální požadavky pro tyto materiály před vstupem do pasterizačního zařízení:

- a) *maximální velikost částic před vstupem do pasterizační jednotky: 12 mm;*
- b) *minimální teplota všech materiálů v pasterizační jednotce: 70 °C;*
- c) *minimální doba ošetření v pasterizační jednotce bez přerušení: 60 minut.*

Masokostní moučka

Masokostní moučka zpracovaná stanoveným postupem, pocházející z asanačních podniků, smí být na bioplyn zpracována, pokud asanační podnik garantuje, že moučka pochází z materiálů 2. nebo 3. kategorie [53]. Moučka dodaná ke zpracování v zařízení na výrobu bioplynu musí být zpracována co nejdříve po dodání. Do té doby však musí být odpovídajícím způsobem skladována. Anaerobní digesce poskytuje téměř ideální podmínky pro bezpečné zpracování masokostní moučky, neboť proteinové i tukové složky jsou velmi snadno biologicky rozložitelné společenstvy acidogenními, syntrofními a metanogenními. Při anaerobním procesu může být totálně rozloženo cca 40 až 60 % hm. (i více) z veškeré organické hmoty masokostní moučky, podle hydraulického retenčního času a aktivity metanogenů. Jako nadstandardní bezpečnostní opatření je možno aplikovat termickou hygienizaci při 150 až 170 °C před anaerobním procesem. Počínající pyrolytické procesy naruší struktury bílkovinných složek, avšak nelze připustit takové přehřátí, kdy již dochází k tvorbě dehtů a ke vzniku dusíkatých heterocyklů. Masokostní moučka obsahuje relativně vysoké koncentrace minerálních složek tvořených převážně fosforečnanem vápenatým. Vlastní fosfor z tohoto zdroje představuje více než dostatečnou zásobu pro potřeby acidogenních, syntrofních i methanogenních mikroorganismů. Biologicky nezpracovaný fosfor a přebytečný vápník přecházejí do tuhého zbytku jako nerozpustné fosfáty a uhličitany. Úřčitý problém může činit poměrně vysoká produkce amoniaku pocházejícího z deaminace proteinových struktur. Pro úspěšnou aplikaci anaerobní digesce ke zpracování masokostní moučky je nutná spolupráce s referenční laboratoří veterinárně hygienické kontroly, která musí potvrdit úplnou hygienizaci digestátu a možnost jeho bezpečného vnesení do zemědělského půdního fondu [52].

Kafilerní tuk

Kafilerní tuk se většinou spaluje přímo v kafilériích nebo v elektrárnách. Pro jeho zpracování anaerobní digescí platí stejná pravidla jako pro masokostní moučku. Zpracovávat lze materiály 2. a 3. kategorie. Tuky mají velký potenciál pro tvorbu bioplynu, ale zároveň i pro tvorbu zápachu a pění vsázky bioreaktorů. Proto je potřeba je dávkovat velmi opatrně.

Kuchyňské odpady a odpady z jídelen

Nařízení [52] zakazuje zkrmování kuchyňských odpadů a zbytků z jídelen. Opět je to obrana proti četným přenosným nemocem (např. Salmonella). Organické, kompostovatelné kuchyňské odpady jsou po pasterizaci/hygienizaci výborným materiálem pro anaerobní digesci, jelikož poskytují velmi vysokou produkci bioplynu (až 100 m³/t odpadu oproti cca 25 m³/t kejdy). Obsahy kuchyňských lapačů tuků včetně olejů po smažení jsou rovněž obecně doporučovány pro anaerobní digesci [44]. Tyto odpady obsahují vysoký podíl sacharidů nebo tuků. Jejich množství není z hlediska zemědělských bioplynových stanic významné (denní zpracovávaná množství se pohybují v jednotkách metrů krychlových). Opět u nich hrozí pění vsázky [43].

Jateční odpady

Pokud jsou anaerobně zpracovávány přímo jateční odpady, je po dezintegraci nutné podrobit je hydrolýze v samostatném stupni před anaerobní digescí. Jateční odpad se rozdrtí a přesně nadávkuje do hydrolyzéro. Při zvýšeném tlaku a teplotě se materiál naruší na úrovni buněčné struktury – uvolní se buněčný lyzát. Po časové prodlevě se provede expanze. Takto upravená

surovina se následně dávkuje k ostatním vstupním materiálům do bioplynové stanice, přičemž vydá až o 30 % více bioplynu v kratším časovém úseku než nehydrolyzovaný materiál a je mikroorganismy zužitkována téměř na 100 %. Hydrolýzu lze s úspěchem použít i na jiné druhy vstupních surovin (např. na drůbeží podestýlku) se stejným efektem tvorby bioplynu.

3.4.5 Biologicky rozložitelný komunální odpad

Komunální odpad obsahuje průměrně 35 % hm. odpadů organického původu. Tato hodnota je závislá na lokalitě a ročním období. Organických látek v komunálním odpadu bývá i 50 % hm. Vytříděním těchto organických odpadů získáme biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO). Jeho složkami jsou například potraviny, odpady z údržby zeleně, papír aj. Tento materiál je po tepelné předúpravě velmi dobře rozložitelný za anaerobních podmínek a zejména ve Spojených státech je výzkum jeho anaerobní digesce v popředí zájmu [43]. Zatížení bioreaktorů zpracovávajících BRKO je možné zvýšit inokulací kulturami izolovanými z bacherových obsahů [44]. Pro výstavbu bioplynových stanic zpracovávajících BRKO je optimální sdružení sil a prostředků místních dodavatelů. Perspektivu mají obce, zemědělské podniky, farmy i komunální sféra [45], [46].

3.4.6 Biologicky rozložitelný průmyslový odpad

Nejvýznamnější jsou odpady z dřevozpracujícího průmyslu jako například dřevní kaly z celulózek. Tyto jsou považovány za vhodný materiál pro anaerobní digesti díky vysokému obsahu rozložitelných ligninů, je ovšem výhodné volit kofermentační poměr s ohledem na optimální hodnoty pH.

3.4.7 Kaly z ČOV

Kaly z čističek odpadních vod jsou používány jako základní substrát pro anaerobní fermentaci s jinými organickými odpady. Kaly by měly projít hygienizační/pasterizační jednotkou. Produkce bioplynu z těchto kalů je relativně nízká. Vznikající digestát představuje zvýšené potenciální riziko z hlediska obsahu rizikových látek a následného uplatnění na zemědělské půdě [4], [16].

3.4.8 Jiné organické odpady

Odpady ze zahradnictví a lesnictví jsou různě obtížně fermentovatelnou biomasou. Odpady z myslivosti a rybářství, obsahy septiků a žump podléhají Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002 [52].

3.5 Ko-fermentace

Pokud anaerobním procesem zpracováváme současně více druhů organické hmoty v jednom zařízení, mluvíme o ko-fermentaci. Již před 2. světovou válkou byly v Německu činěny pokusy se zvýšením produkce bioplynu v čističkách odpadních vod přidáváním odpadů ze sladkého dřeva, obsahu bacherů přežvýkavců, ligninu a rostlinného a obilného odpadu. Při zpracování sladkého dřeva byla produkce bioplynu nejvyšší, ale byla pozvolnější a trvala až 45 dní [9]. Obecně platí, že při dodržení základních pravidel je možné zpracovávat současně všechny druhy

bioodpadů a biomasy v dané lokalitě. Např. v zemědělství lze zpracovávat všechny sorty exkrementů spolu se senem, siláží, atd. Nezbytné je však dodržet několik základních pravidel:

- úprava a homogenizace biomasy (rozdušení, homogenizace na potřebný obsah sušiny);
- optimální kofermentační poměr složek vsázky;
- dodržení optimálních reakčních podmínek dle technologie (konstantní teplota, pH, ...).

Nedodržení vhodných podmínek může způsobit až úplný kolaps anaerobního procesu nebo nedostatečnou hygienizaci [53]. Naopak dodržení správných pravidel může umožnit podstatné zvýšení efektivity odbourávání organické hmoty. Obecně platí, že čím energeticky bohatší biomasu kofermentujeme se základním substrátem, tím přísnější jsou podmínky pro udržení stability anaerobního procesu. Ko-fermentací zemědělských odpadů (exkrementů) s jinými organickými odpady se zvyšuje tvorba metanu [54]. Z jedné tuny čerstvé nebo senážované travní hmoty lze získat průměrně 150 m_N^3 bioplynu s energetickým obsahem $21,6 \text{ MJ/m}_N^3$ (6 kWh/m_N^3). Ko-fermentace papírenských odpadů (dřevních kalů) ve směsi s odpady ze živočišné výroby je jednou z možností využívání těchto specifických odpadů [55]. Zvláště výhodné je zpracovávání odpadů z restaurací a velkokuchyní. Tyto druhy odpadů poskytují až 245 m_N^3 bioplynu na 1 tunu odpadu [56]. Ko-fermentací více rozdílných bioodpadů s prasečí kejdou lze optimalizovat poměr C:N a pH substrátu a zabránit například nadměrnému uvolňování amoniaku. Například anaerobní fermentace velmi plynodajného drůbežního trusu je schůdná právě při ko-fermentaci s hnojem skotu [57]. Mezi substráty velice vhodné pro anaerobní zpracování ko-fermentací patří tukové odpady z masozpracujícího průmyslu [58]. V Dánsku byly pokusně kofermentovány tuky s dobytčím hnojem, přičemž v kapalně fázi byl prokázán vyšší počet druhů mikroorganismů podobných *Methanosarcina siciliae*, než při fermentaci samotného hnoje [59]. Přídavek 1 kg slámy zvyšuje produkci bioplynu o 0,15 až $0,35 \text{ m}_N^3$. Výtěžek bioplynu na 1 tunu odpadu činí přibližně 90 m_N^3 pro zeleninový odpad, 150 m_N^3 pro senážovanou travu, 245 m_N^3 pro kuchyňské odpady a až 800 m_N^3 z tuku z kuchyňských tukových odlučovačů. Dle Váni [60] vnáší kejda do kofermentační směsi živiny a mikroelementy nezbytné pro rozvoj mikroflóry, přičemž je při kofermentaci různých bioodpadů se zvířecími fekáliemi dosahováno vyšší produkce bioplynu než ze samotných zvířecích fekálií. Na vsádkových anaerobních fermentorech objemu 50 litrů porovnával Váňa anaerobní digesti prasečí kejdy o obsahu celkové sušiny 8,1 % hm. (byla smísená s 10 % již fermentované kejdy) s digestí této kejdy ve směsi s různými bioodpady. Nejvyšší produkce metanu dosáhl při kofermentaci kejdy s kuchyňskými odpady viz tabulka 7.

Tabulka č. 7: **Kofermentace různých bioodpadů s prasečí kejdou** [60]

Ukazatel	Jednotka	Varianta složení vsázky					
		1	2	3	4	5	6
Produkce bioplynu	[l/kg vsázky]	36,6	36,2	33,1	52,7	46,4	27,8
	[l/kg sušiny]	364,6	367,4	314,5	484,6	422,2	341,9
Obsah metanu v bioplynu	[% obj.]	50,2	49,2	58,5	60,3	51,9	56,6
Produkce metanu	[l/kg vsázky]	18,3	17,8	19,4	31,8	26,9	15,7
	[l/kg sušiny]	184,8	180,7	184,3	295,5	244,8	193,1

Poznámka: 1 - krátká seč čerstvé trávy, 2 - senáž krátké seče čerstvé trávy, 3 - separovaný domovní odpad, 4 - kuchyňské bioodpady (50 % hm. zbytky jídel a zeleniny, 50 % hm. obsah kuchyňského lapače tuků), 5 - pivovarské mláto, 6 - prasečí kejda (90 % hm. čerstvá kejda, 10 % hm. anaerobně fermentovaná kejda).

3.6 Výstupní produkty anaerobní digesce

Výstupem z procesu anaerobní digesce jsou dva základní produkty: plyný produkt nazývaný bioplyn a kapalný produkt nazývaný digestát či fermentát. Vedle toho může bioplynová stanice produkovat například i kapalný dusičnan amonný, elementární síru aj.

3.6.1 Bioplyn

Složení a základní vlastnosti bioplynu

Bioplyn je směs dvou hlavních plyných složek, metanu a oxidu uhličitého. Poměr těchto hlavních složek závisí na konkrétních podmínkách vzniku a kvalitě substrátu [61]. Nejčastěji činí součet objemových podílů metanu a oxidu uhličitého 92 až 94 % obj. [9]. Vedle metanu a oxidu uhličitého může bioplyn rovněž v závislosti na složení fermentované biomasy a podmínkách procesu obsahovat malá množství kyslíku, vodíku, dusíku, oxidu uhelnatého, sirovodíku, amoniaku, vodní páry a mnoha dalších. Tyto komponenty mají především vliv na životnost vybraných technologických celků. V bioplynu se dále může vyskytovat pestrá směsice minoritních složek. Dle [62] jsou nejčastěji zastoupeny alifatické, alicyklické a aromatické uhlovodíky, alkoholy, trioly, aldehydy a ketony, karbolové kyseliny, estery, ethery, aminy aj. Vlhkost čerstvého bioplynu je 80 až 100 %.

Z hlediska legislativy ochrany ovzduší mohou v některých případech nastat problémy s dodržením emisních limitů sirnatých sloučenin v bioplynu respektive jeho spalínách, které si mohou vyžádat zavedení systému odsiřování bioplynu. Hlavní výhrevnou složkou bioplynu je metan. Dle literatury [12] je běžně obsah vodíku v bioplynu nižší než obsah sirovodíku, viz tabulka 8. Dle literatury [20] se mohou v bioplynu vyskytovat i větší množství vodíku, viz tabulka 9. Vyčištěním bioplynu od sirovodíku a oxidu uhličitého (zušlechtním komprimací nebo zkapalněním) výhrevnost stoupne přibližně na 33 MJ/m³. Srovnání složení bioplynu z různých zdrojů je uvedeno v tabulce 10.

Tabulka č. 8: Chemické složení a některé vlastnosti surového bioplynu dle [12]

Charakteristika	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	H ₂ O	Bioplyn CH ₄ 60 %, CO ₂ 40 %
objemový podíl [%]	55 - 70	27 - 47	1	3	3 - 4	100
výhrevnost [MJ/m ³]	35,8	-	10,8	22,8	-	21,5
zápalná teplota [°C]	650 - 750	-	585	-	-	650 - 750
hustota [kg/m ³]	0,72	1,98	0,09	1,54	-	1,2

Tabulka č. 9: Hlavní složky bioplynu dle [20].

Složka	Jednotka	Zastoupení v bioplynu
CH ₄	[% obj.]	50 - 70
CO ₂	[% obj.]	30 - 40
H ₂	[% obj.]	5 - 10
N ₂	[% obj.]	1 - 2
H ₂ O	[mg/m ³]	0,3
H ₂ S	[mg/m ³]	stopy

Tabulka č. 10: **Porovnání vlastností různých bioplynů dle [41]**

Parametr	Jednotka	Skládkový bioplyn	Bioplyn z ČOV	Bioplyn z prasečí kejdy
Q_n	[MJ/m ³ _N]	18,0 – 24,0	19,0 - 21,5	23,0 - 25,5
CH ₄	[% obj.]	49	61	69
CO ₂	[% obj.]	46	38	31
O ₂	[% obj.]	3	-	-
H ₂	[% obj.]	1	1	-
CO	[% obj.]	1	-	-
N ₂	[% obj.]	-	-	-
H ₂ S	[mg/m ³ _N]	350	1000	2300
NH ₃	[mg/m ³ _N]	-	-	40
Cl-, F-	[mg/m ³ _N]	-	-	-

Poznámka: Výhřevnost Q_n platí pro stav 0 °C, 101 325 kPa [41].

Odsiřování bioplynu

Podle povahy substrátu se může jednou z důležitých složek bioplynu stát sulfan [63]. Většina síry, jež je jako sulfan převedena do bioplynu, pochází z redukovaných forem organicky vázané síry (ze sulfidických a disulfidických vazeb). Síra síranová může být zplyněna sulfátredukujícími bakteriemi v množství rovněž významném [64]. Odsiřování bioplynu je vedle vysušení nejvýznamnějším opatřením ke snižování koroze. K odsiřování bioplynu jsou používány různé metody užívané v plynárenství. Jedná se především o vypírání hluboce podchlazeným metanolem (Systém Rectisol), ale i o využití plynárenské čisticí hmoty [65]. V poslední době se prosazuje odsiřovací metoda založená na cíleném, zpravidla kontinuálním, nafoukávání venkovního vzduchu do fermentoru. Množství vzduchu by mělo činit 3 až 5 % objemu v bioreaktoru přítomného bioplynu. Obsah H₂S klesne např. z 1000 ppm na 10 ppm. [9]. Rovněž je možno použít biologickou metodu rozkladu sulfanu sirnými bakteriemi, které vytvářejí elementární síru a sírany v závislosti na teplotě a pH.

3.6.2 Digestát

3.6.2.1 Základní vlastnosti digestátu

Digestát (tzv. fermentační zbytek nebo fermentát) je druhým produktem anaerobní digesce. Kapalný produkt mokré fermentace je využíván jako kvalitní organické hnojivo (jehož vlastnosti závisí na druhu zpracovávané vstupní směsi) na zemědělských pozemcích. Biomasa po proběhnutí suché anaerobní fermentace je rovněž běžně využívána jako organické hnojivo nebo pro výrobu certifikovaných organo-minerálních hnojiv. Vlastnosti digestátu závisí především na druhu zpracovávaných materiálů, méně už na technologickém procesu. V porovnání s přímou aplikací surového materiálu (např. prasečí kejdy) má anaerobně fermentovaný substrát řadu výhod :

- substrát je biologicky stabilizovaný a homogenizovaný, případně i hygienizovaný;
- zvýšení využitelnosti živin a snížení jejich vyplavitelnosti;
- snížení obsahu zvířecích patogenů a semen plevelů;
- snížení pachové zátěže okolí oproti zápachu z hnojení surovou kejdou;
- pokles emisí skleníkových plynů při aplikaci.

Dle Nařízení 1774/2002 (ES) o vedlejších živočišných produktech (Animal By-Products Regulation) [52] jsou rozlišovány dvě základní skupiny digestátů:

- ◆ Digestáty ze statkových hnojiv.
- ◆ Digestáty z bioodpadů.

3.6.2.2 Digestáty ze statkových hnojiv

Digestáty z rostlinné biomasy

V současnosti se v zahraničí nečastěji provádí anaerobní digesce kukuřičné siláže, dalších píceň nebo energetických rostlin. Dále je často fermentována čerstvá nebo senážovaná travní fytomasa, jejímž zdrojem jsou nejen louky, ale i veřejná zeleň a pod. Sušina digestátu, míněného jako hnojivo, by měla obsahovat minimálně 25 % hm. spalitelných látek a 0,6 % hm. celkového dusíku. Takový digestát je považován za *typové organické hnojivo vyrobené anaerobní digestací ze statkových hnojiv* (číslo typu organického hnojiva 18. 1. e). Jiné digestáty určené pro zemědělskou půdu jsou považovány za *netypové organické hnojivo*. Vyhláška 209/2005 Sb. [66], kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb. [67], o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění vyhlášky č. 401/2004 Sb. [68] zrušila zvláštní ustanovení, že digestát (hnojivo typu 18. 1. e) je možné aplikovat na půdu maximální stanovenou dávkou 30 t/ha nejvýše jednou za tři roky. Limitní hodnoty rizikových prvků digestátu jsou uvedeny v tabulce č. 9. Při využití digestátu na zemědělské půdě je nezbytné tuhé digestáty zapravit do půdy do 48 hodin a tekuté digestáty do 24 hodin. Aplikace musí být rovnoměrná po celém pozemku, je zakázáno aplikovat na půdu zasněženou, přemokřenou nebo promrzlou. Ve zranitelných oblastech je třeba respektovat Nařízení vlády č. 103/2003 Sb. [69], zejména omezení hnojení dusíkem. Je nutno zamezit vniknutí digestátu do povrchových vod nebo na sousední pozemek. Aplikace digestátu je předmětem evidence použitých hnojiv podle vyhlášky č. 274/1998 Sb., příloha č. 1 [70]. Pro tuhý i tekutý digestát ze statkových hnojiv musí být dostatečně skladovací prostory. V případě, že je tento digestát požíván pouze na pozemcích producenta, nemusí být registrován jako organické hnojivo. V případě provozování bioplynové stanice sdružením zemědělských subjektů dodávajících siláž a odebírajících digestát nebo v případě šíření digestátu prodejem musí být tento digestát registrován podle zákona o hnojivech [36].

Digestáty ze zvířecích fekálií

Pro digestát z anaerobní digesce hnoje, kejdy, drůbežího trusu platí obdobné legislativní požadavky jako pro digestát z rostlinné biomasy. Navíc musí splnit hygienické požadavky pro vedlejší živočišné produkty 2. kategorie podle Evropské legislativy (Animal By-Products Regulation). Pro digestát ze zvířecích fekálií je požadován podle Nařízení Evropské komise č. 208/2006 [71] nový způsob hodnocení hygienizace reprezentativních vzorků digestátu při uskladňování, a to:

pro indikátorový organismus *Escherichia coli*:

$n = 5$; $m = 0$; $M = 1000$; $c = 5$;

pro indikátorový organismus *Enterococaceae*:

$n = 5$; $m = 0$; $M = 1000$; $c = 5$;

pro indikátorový organismus *Salmonella* v 25 g vzorku:

$n = 5$; $m = 0$; $M = 0$; $c = 0$;

kde n = počet vzorků , které musí být testovány

m = prahová hodnota počtu bakterií (KTJ v 1 g)

M = maximální počet bakterií (KTJ v 1 g)

c = počet vzorků, kde je povolena hodnota mezi m a M .

Obdobné hygienické požadavky jsou kladeny na digestáty z kofermentace zvířecích fekáliemi s rostlinnou biomasou.

3.6.2.3 Digestáty z bioodpadů

Legislativní požadavky na digestáty z anaerobní digesce biologicky rozložitelných komunálních nebo průmyslových odpadů jsou podle legislativy odpadů a týkají se připravované, ale dosud nevydané vyhlášky o bioodpadech. Mezi tyto odpady patří i kuchyňské a jateční odpady, které jsou vedlejšími živočišnými produkty 3. kategorie a masokostní moučka (MBM) 2. nebo 3. kategorie. Digestát vyrobený podle požadavků připravované vyhlášky o bioodpadech je nazýván *rekultivačním digestátem* [72]

Digestáty z bioodpadů, které nejsou ABP (Animal By-Products)

Připravovaná vyhláška o bioodpadech rozděluje tyto digestáty na dvě třídy: *třída I* je používána na povrchu terénu určeného nebo užívaného pro městskou zeleň včetně parků a lesoparků. *Třída II* je používána k pěstování energetických, technických a okrasných rostlin, dále v průmyslových zónách u liniových staveb, při rekultivacích, k obohacování antropogenních půd a jako suroviny pro výrobu rekultivačních substrátů. Limitní koncentrace vybraných rizikových látek podle připravované vyhlášky o bioodpadech jsou uvedeny v tabulce 11 [72].

Tabulka č. 11: **Limitní koncentrace vybraných rizikových látek podle připravované vyhlášky o bioodpadech** [72]

Sledovaný ukazatel	Třída I(*) [mg/kg sušiny]	Třída II (*) [mg/kg sušiny]	Ze statkových hnojiv [mg/kg sušiny]
Cd	0,7	1,5	2
Cr	100	150	100
Cu	100	150	100
Hg	0,5	1	1
Ni	50	75	50
Pb	100	150	100
Zn	200	400	400
As	x	x	10
Mo	x	x	5

Poznámka: (*) - Normalizováno na 30 % hm. obsahu organické hmoty.

Hygienické požadavky na digestáty z bioodpadů, které nejsou ABP, jsou následující:

- *Salmonella spp.* v 50 g: negativní nález v 5 vzorcích.
- Termotolerantní koliformní bakterie: z 5 vzorků musí být u 2 vzorků nižší nález než 300 KTJ/g a u 3 vzorků nižší nález než 10 KTJ/g.

Bioodpady (například odpady ze zeleně, ze zpracovatelského průmyslu, z tržišť apod.) musí být procesem anaerobní digesce hygienizovány. Stanovena je fermentační teplota minimálně 55 °C po dobu 24 hodin bez přerušení. Dále je stanovena minimální doba zdržení bioodpadů

v anaerobním bioreaktoru 20 dnů. V případě nesplnění těchto technologických podmínek je nutné:

- a) bioodpady předupravit v hygienizátoru při teplotě 70 °C po dobu 1 hodiny,
- b) digestát upravit v hygienizátoru při teplotě 70 °C po dobu 1 hodiny,
- c) zabezpečit aerobní kompostování digestátu [52].

Digestáty z bioodpadů ABP (kuchyňských a jatečních odpadů)

Pro digestáty ze zpracování odpadů živočišného původu (*Animal By-Products*) platí požadavky stejné jako pro digestáty z ostatních bioodpadů. Na bioplynových stanicích jsou zpracovávány pouze odpady živočišného původu 3. kategorie. Bez předúpravy (hygienizace) jsou zpracovávány materiály, které již prošly režimem zpracování kafilerních zpracovatelských závodů (masokostní moučka, kafilerní tuk). Bioplynová stanice zpracovávající ABP (včetně hnoje a kuchyňských odpadů) musí být dle evropské legislativy vybavena pasterizační (sanitární) jednotkou, kterou není možné obejít. Pasterizační jednotka musí být opatřena zařízením ke sledování teploty v reálném čase a záznamovým zařízením ke stálému zaznamenávání výsledků těchto měření a vhodným bezpečnostním systémem bránícím nedostatečnému ohřevu. Dále musí být závod vybaven zařízením k čištění a dezinfekci vozidel a kontejnerů sloužících k přepravě ABP. Každá bioplynová stanice zpracovávající ABP musí být vybavena vlastní laboratoří nebo využívat službu externí schválené laboratoře. Mezi povinnosti provozovatele bioplynové stanice patří přijetí systematických opatření proti ptákům, hlodavcům a hmyzu doložený programem hubení škůdců [72].

Vzorky digestátů z bioodpadů ABP odebrané během skladování nebo vyskladňování musí vyhovovat následujícím normám:

- *Salmonella*: nepřítomnost v 25 g: $n = 5$, $c = 0$, $m = 0$
- *Enterococaceae*: $n = 5$, $c = 1$, $m = 1000$, $M = 5000$
- *Escherichia coli*: $n = 5$, $c = 1$, $m = 1000$, $M = 5000$

n = počet vzorků, které mají být vyšetřeny,

m = prahová hodnota počtu bakterií; výsledek je považován za uspokojivý, pokud počet bakterií ve všech vzorcích není vyšší než m ,

M = nejvyšší hodnota počtu bakterií; výsledek je považován za neuspokojivý, pokud je počet bakterií v jednom nebo více vzorcích vyšší nebo roven M ,

c = počet vzorků, u nichž může být počet bakterií mezi m a M ; celý vzorek je považován za přijatelný, pokud ostatní vzorky mají počet bakterií nižší nebo roven m .

Jakostní znaky digestátu

Hlavními jakostními znaky digestátu jsou obsah celkové sušiny a dále složení sušiny (obsah organických látek a obsahy anorganických živin N, P, K, Ca, Mg). Pro představu, zda je možné dodržet legislativou požadované parametry jakostních znaků digestátů, jsou v tabulce 12 uvedeny obsahy živin a další charakteristiky různých digestátů (v tekuté i tuhé formě) ze zahraničních bioplynových stanic. Z uvedených hodnot se dá předpokládat vysoká agronomická účinnost digestátů. Obsah sledovaných kovů například v digestátu z kukuřičné siláže je překvapivě nízký, viz tabulka 13 [72].

Tabulka č. 12: **Obsah organických látek a živin v tuhé a tekuté části digestátu [72]**

Parametr	Jednotka	Digestát prasečí kejdy		Digestát drůbežního trusu		Digestát kukuřičné siláže		Digestát jatečního odpadu	Digestát směsného ABP	
		tuhý	tekutý	tuhý	tekutý	tuhý	tekutý	tekutý	tuhý	tekutý
sušina	[% hm.]	27,2	5,2	13,7	5,5	26,1	4,9	10,4	28	5,6
spalitelné látky	[% hm. suš.]	51,8	47,3	76,6	63,1	82,3	64,6	80,3	71,9	65,8
dušík N	[% hm. suš.]	3,9	11	5,4	10,3	2,7	9,9	5,8	3,55	9,5
fosfor P ₂ O ₅	[% hm. suš.]	5,6	5,4	5,9	4,1	5	3,9	4,8	5,24	4,51
draslík K ₂ O	[% hm. suš.]	1,6	5,8	2,5	6,3	1,7	9,1	5,2	2,32	7,18
vápník CaO	[% hm. suš.]	4,9	3	3,9	3,1	2,2	2,6	2,9	3,3	2,82
hořčík MgO	[% hm. suš.]	6,1	1,7	1,9	1,9	2	1	2,8	3,33	1,6
uhlík C	[% hm. suš.]	25,9	23,6	38,3	31,55	41,2	32,3	40,15	35,95	30,9
C:N	[-]	8,93	2,15	7,09	3,06	15,2	3,26	5,42	10,12	3,13

Tabulka č. 13: **Obsah sledovaných kovů v digestátu z kukuřičné siláže [72]**

Kov	Obsah kovu [mg/kg sušiny]	
	Tuhý digestát	Tekutý digestát
Cd	<0,15	0,35
Cr	6,8	57
Cu	10	49
Hg	0,003	0,021
Ni	-	-
Pb	<3,50	3,3
Zn	54	280
As	<0,10	0,18
Mo	1,5	4,4

Úprava digestátu

Vlastnosti digestátu je často potřeba upravit určitými technologickými procesy tak, aby se zvýšila jeho užitná hodnota. Z digestátu je možno separovat tuhovou frakci lisováním (kalolis), sedimentací či odstřeďováním (odstředivka), za účelem jejího následného zhodnocení. Tuhá frakce s vysokým obsahem organické hmoty se může kompostovat, čímž vznikne kvalitní statkové hnojivo, může se mísit na organo-minerální hnojivo, méně častým způsobem je energetické využití jako paliva po zpracování do formy pelet. Zbylá tekutá frakce s vyšším obsahem živin (NPK) může být opět aplikována na pole jako hnojivo. V případě, že pro ni není uplatnění, může být aerobně dočištěna jako odpadní voda a vypuštěna do vodoteče. Následné dočišťování odpadní vody ale výrazně zvýší investiční i provozní náklady celé technologie. Z výše uvedené skutečnosti vyplývá, že návaznost provozu bioplynové stanice na zemědělství je vysoce žádoucí [60].

Úpravu digestátu je možno vést přesně podle výsledků rozborů půdy. Digestát je možno dodatečně hygienizovat, dotovat minerály, vápnem, upravovat na požadovanou vlhkost a tvar, balit pro účely prodeje apod.

Finální produkt musí při vyskladnění splňovat následující požadavky:

- *Salmonella*: nepřítomnost v 25 g: n = 5, c = 0, m = 0, M = 0;
- *Enterobacteriaceae*: n = 5, c = 2, m = 10, M = 300 v 1 g;

kde: n - počet vzorků, které mají být vyšetřeny;

m - prahová hodnota počtu bakterií; výsledek je považován za uspokojivý, pokud počet bakterií ve všech vzorcích není vyšší než m ;

M - nejvyšší hodnota počtu bakterií; výsledek je považován za neuspokojivý, pokud je počet bakterií v jednom nebo více vzorcích vyšší nebo roven M ;

c - počet vzorků, u nichž může být počet bakterií mezi m a M ; celý vzorek je považován za přijatelný, pokud ostatní vzorky mají počet bakterií nižší nebo roven m [72].

Takový digestát je jedinečným zemědělským substrátem a je ze zdravotního a ekologického hlediska bezpečný.

Zhodnocení stability digestátu

Stabilitu digestátu je možno hodnotit pomocí termogravimetrických analýz, které ukazují hmotnostní a energetické změny materiálu. Ve Španělsku byly například provedeny diferenční termická analýza (DTA) a derivační termogravimetrie (DTG) souboru vzorků digestátů [73]. Studie měla za cíl kontrolovat proces anaerobní digesce pomocí tepelné analýzy a stanovit tak míru stabilizace digestátu. Hodnocen byl proces anaerobní fermentace primárního čistírenského kalu, organického podílu tuhých komunálních odpadů (OFMSW s vysokým zastoupením odpadních potravin) a směsi těchto dvou bioodpadů s 50 %-ním podílem. Analýzou DTG bylo zjištěno, že teplota (T_{50}), při které vzorky doodplyněného digestátu ztratí 50 % původní hmotnosti, musí být vyšší než 450 °C, přičemž dávkované vstupní směsi měly tuto teplotu pod 400 °C. Křivky DTA ve všech vzorcích digestátu ukázaly uvolnění energie při vysokých teplotách (kolem 500 °C), které nebyly zjištěny u dávkovaných vstupních směsí. Příměs potravin v OFMSW přispěla k většímu úbytku prchavých látek při kofermentaci [73].

3.7 Základní druhy anaerobních technologií

Technologický proces anaerobní digesce lze provádět buď takzvaně suchou a nebo mokrou metodou. Tyto dva způsoby anaerobního zpracování organické hmoty a produkce bioplynu se odlišují obsahem vlhkosti v substrátu a tedy i uspořádáním technologických zařízení a způsobem práce (kontinuální/periodický) a účinností přeměny organické hmoty na bioplyn. K produkci bioplynu z organické hmoty slouží bioplynové stanice. Ve světě existuje mnoho odlišných systémů mokrých a suchých bioplynových stanic, mezi nejznámější patří "hi-tech" systémy BTA, DRANCO, KOMPOGAS, VALORGA, WABIO aj., které se odlišují především konstrukcí bioreaktorů ve smyslu rozdělení procesu na více fází [74]. Dále se rozvíjí zjednodušené varianty konstrukčních řešení bioplynových stanic, označované jako "farm-tech". Podrobný popis jednotlivých systémů je nad rámec této práce.

3.7.1 Mokrý anaerobní digestce

Bioplynová stanice pro mokrou anaerobní digestci (fermentaci mokrou metodou) kontinuálně zpracovává biomasu v suspenzi. Je schopna zpracovat biomasu s obsahem celkové sušiny do cca 15 až 20 % hm., ovšem z pohledu bezpečného udržení stability anaerobního procesu a především čerpatelnosti vstupní směsi je účelné nepřekračovat obsah celkové sušiny 10 % hm. [59].

Náročnost čerpání suspenzí biomasy do mokrých bioreaktorů je vysoká a časté poruchy čerpadel snižují provozní spolehlivost mokré technologie.

Stanice je obvykle na vstupu tvořena míchací (homogenizační) jímkou, z níž je vstupní směs bioodpadů čerpadly vháněna do anaerobního bioreaktoru. Na západě v poslední době převažuje stavba vícestupňových bioreaktorů. Výstup z bioreaktoru je připojen k jímce digestátu (mezisklad fermentačního zbytku - uskladnění před jeho konečným využitím např. aplikací na pole, apod.). Tento způsob fermentace silně převažuje nad fermentací suchou (např. v SRN celkem existuje cca 3500 bioplynových stanic, z toho pouze několik set používá suchou metodu), což souvisí s historickým vývojem, neboť většina stanic byla stavěna u intenzivních chovů zvířat s kejdovým ustájením a na čistíčkách odpadních vod [75].

Substráty pro mokrou metodu

Nejčastějšími případy použití mokré metody jsou bioplynové stanice na výkrmnách prasat, kde průměrný obsah organické sušiny v prasečí kejďe činí nejčastěji 3 až 5 % hm, nebo na výkrmnách hovězího dobytka, kde průměrný obsah organické sušiny činí 4 až 8 % hm. Zde lze pro intenzifikaci výroby bioplynu a zlepšení ekonomiky stanice s výhodou doplnit chybějící organickou hmotu (do obsahu cca 12 % hm.) ko-fermentací s fytomasou nebo jinou biomasou o vyšším obsahu sušiny (kaly z papíren, čistírenské kaly, travní hmota, masokostní moučka, kuchyňské odpady, tukové odpady, odpady z výroby bionafty, odpady z mlékáren, konzerváren, jatek, lihovarů a pivovarů aj.). Nutnou podmínkou pro ko-fermentaci je zajištění "čerpatelnosti" ko-fermentované biomasy. Zpravidla jde rovněž o dezintegraci (např. úpravu trávy na řezanku do 3 - 5 cm). Čerstvá rostlinná hmota je však k dispozici jen po omezenou roční dobu, proto se kofermentují i senážované, silážované a sušené materiály. Z 1kg sušiny travních senáží lze získat 200 až 400 l metanu. Z různých částí rostlin (listy kvěťáku, nať slunečnice nebo cukrovky, stébla kukuřice nebo řepky, ovesná sláma apod.) lze získat 1000 až 5000 m³ metanu na hektar obdělávané plochy [61].

Obecně se nedoporučuje použití mokré fermentace pro zpracování substrátů s vysokým obsahem sušiny (nad 20 % hm.) a substrátů s vysokým obsahem ligninu, jako např. drůbeží podestýlky na bázi dřevní hmoty (piliny, hobliny). Nastávají časté provozní potíže s ucpáváním čerpadel a tvorbou krust zamezujících odvodu bioplynu. Jelikož se lignin anaerobní digestí téměř nerozkládá, lze doporučit především části listnatých dřevin co nejnižšího stáří [61].

Ohřev substrátu na optimální teplotu je zajišťován stěnovým vytápěním bioreaktoru nebo klasicky ohřevem substrátu mimo reaktor (výměňíkem kal/voda). Výměňík ovšem způsobuje teplotní šok, což negativně ovlivňuje aktivitu anaerobních mikroorganismů a výtěžnost bioplynu je nižší. Ohřev výměňíkem je také energeticky náročnější (spotřeba elektřiny na pohon kalových čerpadel) a bývá také příčinou poruch (ucpávání výměňíku) [76].

I při řešení ohřevu substrátu v moderním reaktoru se stěnovým vytápěním je nutné dodržet určitá kritéria daná omezenou rychlostí šíření tepla resp. vyrovnávání teplotního profilu směrem od stěn k ose reaktoru. Empiricky jsou hledány optimální hodnoty poměru průměr/výška bioreaktoru a maximálního průměru bioreaktoru. V praxi to znamená omezení reakčního objemu jednoho reaktoru na cca 2 500 m³ [77]. Optimální teplotní pole a pH v reaktoru je zajišťováno mícháním substrátu v pravidelných cyklech. Poruchy míchadel v reaktoru a homogenizační

jímce významně zvyšují nespolehlivost technologie a podílí se na celkové energetické (vysoká vlastní spotřeba elektřiny), servisní (opravy elektromotorů, ložisek, vrtulí, apod.) a investiční náročnosti bioplynové stanice.

3.7.2 Suchá anaerobní digesce

Suchá anaerobní digesce (suchá fermentace, suchá metanizace), v cizojazyčné literatuře [78] označovaná jako *dry anaerobic composting* (*suché anaerobní kompostování*), je zvláštní způsob výroby bioplynu anaerobní digescí, vedenou za podmínek do jisté míry podobných podmínkám kompostování. Výsledný produkt lze po procesu kompostovat aerobně za vzniku kompostu. Tento způsob fermentace není zdaleka tak rozšířený jako mokrá cesta, přestože je starší a poskytuje vyšší výtěžky bioplynu [9], [79]. V dalším textu je uveden stručný popis suché metody anaerobní digesce.

Substrát s obsahem sušiny 20 % až 60 % hmotnosti je přímo fermentovatelný pouze suchou metodou, přičemž bioplynová stanice sestává z několika reakčních komor (např. kovový kontejner nebo zděná komora s plynotěsnými vraty a reakčním objemem několik desítek metrů krychlových) a meziskladu. Doprava zpracovávaného materiálu do komor a z nich je zpravidla prováděna běžnou manipulační technikou (např. traktor s radlicí). Proces je diskontinuální (periodický), reakční komory jsou zaplněny, rozběhnutí reakce trvá 3 dny, vlastní reakce a produkce bioplynu trvá 24 - 27 dnů, nakonec jsou reakční komory vyprázdněny a začíná jejich nové plnění. Anaerobní proces je řízen dávkováním procesní tekutiny, což je v podstatě kapalný podíl odvedený z minulé vsázky, obsahující fermentační mikroorganismy. Reaktory u suché cesty jsou jednodušší, provozně spolehlivější a méně investičně náročné [79]. Kromě optimálního obsahu sušiny je potřeba docílit také optimální objemové struktury substrátu resp. měrné hmotnosti (doporučené rozmezí je 600 - 800 kg/m³).

Substráty pro suchou metodu

Suchou fermentaci lze použít i u biomasy, kterou nelze mokrou cestou zpracovat (např. podestýlky na bázi pilin). Zpracovat lze i směsné/netříděné odpady (tzn. s obsahem příměsí plastů, dřeva, kovů, zeminy, atd.). Optimální obsah sušiny se pohybuje v závislosti na zpracovávaném substrátu mezi 30 % hm. až 35 % hm.

Zpracovávanou organickou hmotu lze dělit do tří skupin :

- tuhé substráty (chlévká mrva, atd.);
- tříděný komunální odpad (biologicky rozložitelný podíl);
- separované podíly z tekutých substrátů.

Suchá anaerobní fermentace může být v případě kravského hnoje perspektivní alternativou při mezofilních teplotních podmínkách [78].

Používané technologie suché kofermentace

Technologie suché kofermentace je obvykle realizována jako diskontinuální a zařízení pracující tímto procesem možno dále rozdělit na výstavbové a vestavbové. Jedná se zpravidla o zděné nebo lité betonové fermentační komory s vlastní nosnou střechou. Vestavbové technologie využívají stávající nevyužívané objekty, v zemědělství např. seníky, ocelokolny, v některých

případech i kravíny, apod., do nichž jsou umístěny lehčené fermentační komory se zpevněnou boční, zadní a čelní stěnou. Komory jsou opatřeny plynotěsnými vraty. Principiálně lze jak výstavbové, tak i vestavbové technologie navrhovat jako jedno, případně víceetapňové.

Víceetapňové technologie jsou opět investičně a provozně náročnější [79]. Pro docílení kontinuální produkce bioplynu je celkový reakční objem rozdělen do více reakčních komor. Využívá se mezofilní anaerobní proces, tzn. že mikrobiální zpracování substrátů probíhá při reakčních teplotách 32 °C až 38 °C. Optimální pH se pohybuje mezi 6,5 -7,5. Při výměně substrátu v jedné z reakčních komor je bioplyn produkován ostatními reakčními komorami. Počet a velikost reakčních komor určují rovnoměrnost kontinuální produkce bioplynu. Technologie suché či polosuché (přibližně 20 % obj. sušiny) fermentace bioodpadů je hojně zavedena v SRN, Švýcarsku a Japonsku [80], [81].

Rozdělení celkového reakčního objemu, potřebného pro zpracování daného množství biomasy nebo daného množství substrátu, do více reakčních komor, přináší jednu velkou technologickou výhodu: možnost řízení anaerobní digestce v reálném čase. Toto není u mokré fermentace, kde je zpracováván velký objem organické hmoty v jednom bioreaktoru a navíc s kontinuálním přítokem čerstvého substrátu, možné. U mokrých procesů lze z pohledu optimalizace podmínek průběhu anaerobní digestce pouze "nastavit zlatou střední cestu".

Ekonomická výhodnost suché metody

V ČR není v současné době v provozu ani jedna bioplynová stanice pracující v režimu suché anaerobní fermentace. Stávající aplikace suché cesty v zahraničí mívají ve srovnání s pokročilou mokrou metodou nižší specifické výtěžnosti bioplynu. Suché fermentory jsou ale schopny zpracovávat substráty s cca 4 násobným obsahem organické hmoty oproti bioreaktorům pro mokrou cestu. Vhodným uspořádáním suchých fermentorů je možné dosáhnout téměř lineárního průběhu produkce bioplynu. Investiční náročnost suché technologie pro dané množství organické hmoty je ve srovnání s metodou mokrou jednoznačně nižší. Srovnání hlavních výhod a nevýhod suché metody je uvedeno v tabulce 14.

Suchá fermentace si žádá:

- reakční objem přibližně 4 x menší než u mokré fermentace;
- menší uskladňovací kapacity (odpadají vstupní a výstupní jímky);
- menší provozní náklady (odpadá vytápění, čerpání, míchání);
- menší spotřebu technologického tepla;
- méně náročnou kontrolu zařízení.

Proces suché fermentace (na rozdíl od mokré) lze on-line optimalizovat a řídit systémem měření a regulace bioplynové stanice. Suché procesy jsou obvykle stabilnější. Z tohoto pohledu je suchá fermentace perspektivní technologií. Nabízí se zde možnost využití dotací ze státních nebo evropských zdrojů [79].

Tabulka č. 14: **Porovnání výhod a nevýhod suché fermentace dle [79]**

Výhody	Nevýhody
Umožňuje zpracovávat biomasu v rozmezí 25 až 60 % hm. celkové sušiny.	Nižší stupeň degradace organické hmoty.
Rychlý start reakce (k plné produkci bioplynu dochází do tří dnů).	Diskontinuální proces.
Možnost řídit biochemický proces (pH, teplota) v jednotlivých fázích procesu a v reálném čase.	Počáteční zavzdušnění bioplynu.
Netřeba velké množství topného média pro start i udržení reakce. Využití aerobního ohřevu	
Fermentační zbytek není třeba po vyskladnění odvodnit.	
Fermentační zbytek lze pro další zpracování dosušit odpadním teplem.	
S minimálními náklady lze upravit fermentační zbytek hygienizací.	
V technologickém procesu je minimum rotačních elektrických strojů (minimální údržba).	

Poznámka: Kontinuální technologie je možná při činnosti většího počtu fermentorů.

3.8 Zápach z procesu anaerobní digesce

V poslední době se díky vzrůstající tendenci současného zpracovávání rozličných bioodpadů množí případy stížností obyvatelstva na zápach z bioplynových stanic. Viníkem těchto problémů jsou vesměs provozovatelé bioplynových stanic, neboť dostatečně včas nezavedli patřičná organizační a technologická opatření, kterými by předešli šíření zápachu do okolí.

V bioplynové stanici pracující s mokrou metodou fermentace může docházet k šíření zápachu z několika příčin. Samotné anaerobní bioreaktory zdrojem zápachu být nemohou, protože se jedná o uzavřené nádoby, ale dovoz bioodpadů na nezakrytých automobilech, jejich, byť krátkodobé, skladování v nezakrytých prostorech a mísení v ne zcela zakryté jímce vstupní směsi může být zdrojem zápachu. Jelikož jsou bioplynové stanice většinou součástí zemědělského statku, lze předpokládat jistou úroveň pachové zátěže okolí i bez přispění bioplynové technologie. V případě nadměrných přídavek bioodpadů k základnímu substrátu dochází k tvorbě nedostatečně anaerobně zpracovaného výstupního produktu, který je označován jako digestát. Skladovací jímky digestátu pak mohou být dalším významným zdrojem zápachu, zvláště, pokud se stále uvolňuje sulfan, organické sulfidy a merkaptany. Hnojení kvalitně vyhnílym digestátem ať již se zaoráváním nebo takzvaně “na list” je vždy z hlediska pachových emisí k okolí šetrnější než hnojení surovou kejdou, jíž je digestát náhražkou. To ovšem neplatí v případě hnojení nedostatečně anaerobně fermentovaným digestátem.

Mezi hlavní opatření při předcházení šíření zápachu, které mohou provozovatelé bioplynové stanice provést, je zakrytí skladu vstupních surovin a zakrytí homogenizační jímky, jímek digestátu, případně i jímky odkalovací. Vzduch a pachy z uzavřených skladovacích prostor vstupních materiálů, z prostor nad hladinou vstupní směsi v homogenizační jímce i nad hladinou v jímce digestátu je možno odsávat a vracet do atmosféry přes biologický filtr.

4 PRAKTICKÉ APLIKACE MOKRÉ ANAEROBNÍ DIGESCE

4.1 Bioplynové stanice a využití bioplynu v ČR

V ČR byly první pokusy s anaerobním využitím slamnaté chlévské mrvy k výrobě bioplynu provedeny ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky Praha od roku 1956. Do začátku “ropné krize“ (rok 1973) se o tuto technologii v zemědělství nikdo významněji nezajímal. V letech 1982 až 1992 probíhal na VÚZT Praha výzkumný projekt zaměřený na využití exkrementů z velkochovů hospodářských zvířat pro výrobu bioplynu [82]. Na výzkumu a vývoji se podíleli například VÚZT Praha, TMS Pardubice (nyní Biogas Technology, a.s.), Hydroprojekt a.s. Praha, Vysoká škola veterinární a farmaceutická Brno a několik dalších včetně několika zemědělských podniků. S významnou státní podporou byly realizovány experimentální bioplynové stanice, z nichž některé pracují dodnes. Po roce 1992 byla státní podpora bioenergetického programu v resortu Ministerstva zemědělství zaměřena směrem na “lihový program“ a jiné programy, přičemž na “bioplynový program“ nezbývaly prostředky. Výstavba bioplynových zařízení se omezila na několik malých jednotek, financovaných z podnikových zdrojů. Dnes je metoda mokré anaerobní digesce zcela běžně využívána na čistíčkách odpadních vod k likvidaci aktivovaného kalu a rovněž je na vzestupu na skládkách tuhých komunálních odpadů. Zájem o bioplynové stanice, sloužící jako samostatné jednotky v zemědělství, které anaerobní stabilizací zpracovávají organický odpad vznikající v zemědělském podniku (nejčastěji na chovné farmě) a produkují “zelenou energii“, stoupá. Ačkoliv má ČR dlouholetou tradici ve výzkumu, vývoji i provozování bioplynových stanic a naši odborníci staví bioplynové stanice v jiných zemích, ve větším měřítku se technologie bioplynových stanic u nás nerozšířila. Anaerobní digesce fytomasy je v České republice ve stadiu modelových experimentů. V zahraničí věnuje tomuto problému pozornost celá řada interdisciplinárních pracovišť využívajících zkušenosti z anaerobní digesce komunálního bioodpadu a zvířecích exkrementů. Transfer zahraničních poznatků z této oblasti do České republiky je žádoucí, neboť bioplynové stanice, kofermentující řadu různých materiálů, jsou budovány po celém světě, ale u nás dosud existuje jen několik málo efektivních aplikací zaměřených předně na zpracování zvířecích fekálií. Praktické aplikace těchto poznatků by mohly vyřešit problém přebytečné travní hmoty ze zemědělství i z komunální sféry a pomoci řešit i využití jiných problémových bioodpadů [82].

Na několika řadu let úspěšně provozovaných zemědělských bioplynových stanicích v ČR je v převážné míře zpracovávána prasečí a hovězí kejda nebo hovězí slamnatý hnůj (či chlévská mrvka). Z hlediska ekonomie provozu bioplynové stanice jsou účelně zpracovávány i jiné než zemědělské odpady. V úvahu přichází například zpracování odpadů ze stravovacích zařízení (hlavně tukové odpady), nebo fytomasy [83]. V tomto případě se dosahuje dvojího efektu, zvýší se produkce bioplynu a získá se finanční úhrada za likvidaci odpadů od producenta. Maximalizace ekonomické efektivnosti je v zahraničí ovšem dosahováno vysokосуšinnými a vícestupňovými fermentačními technologiemi. Tyto technologie rovněž úspěšněji zabezpečují produkci hygienizovaného stabilizovaného organického hnojiva [84].

Centralizované bioplynové stanice na rozdíl od menších bioplynových stanic samostatného zemědělce zpracovávají odpady z několika zemědělských farem či podniků z blízkého okolí (cca do 50 km). Výhodou centralizovaných bioplynových stanic je [85]:

- nižší jednotkové ceny investic;
- efektivnější využití investic (cisterny, dopravní prostředky atd.);
- kvalifikovanější obsluha bioplynové stanice;
- vzhledem k větší produkci bioplynu možnost komplexnějšího uplatnění přebytků tepla, elektrické energie (dodávky do elektrické sítě a sítě centrálního vytápění);
- vyrovnanější kvalita anaerobně stabilizovaného odpadu;
- menší potřeba stavebních pozemků;
- lepší možnosti získání úvěrů a dotací.

V současné době je v České republice v provozu přibližně dvacítko větších bioplynových stanic na živočišný odpad, které celkem zpracovávají přes 200 tisíc tun materiálu ročně při výrobě více než 6 milionů m³_N bioplynu ročně. Využívají tak odhadovaný ekonomický potenciál z pouhých maximálně deseti procent [86]. Nejstarší bioplynová stanice Třeboň je v provozu od roku 1974 a zpracovává prasečí kejdu ve směsi s čistírenskými kaly. Podobné zařízení je v provozu v Kroměříži. V Jindřichově a Slavkově u Brna jsou stanice zpracovávající slamnatý hnůj. V Trhově Štěpánově je zpracovávána hovězí kejda. V Zavidově zpracovávají drůbeží trus. Ostatní zařízení zpracovávají prasečí kejdu. Ve Velkých Albrechticích a Klokočově je zpracovávána kejda s masokostní moučkou. Jedna z nejnovějších bioplynových stanic v Letohradu na Orlickoústecku byla zprovozněna v roce 2004. Zpracovává hovězí kejdu s odpady z jatek, případně s trávou. Nejnovější je bioplynová stanice v Jevišovicích (Velký Karlov). Ta je zároveň největší bioplynovou kogenerační elektrárnou v Evropě. Ročně vyrobí 2,7 MW tepelné a elektrické energie.

Bioplynové stanice zaměřené čistě na zpracovávání komunálního bioodpadu nebo rostlinného bioodpadu v ČR dosud neexistují. Je však zpracována řada investičních záměrů. Výhledově se počítá s vybudováním až 113 bioplynových stanic (do roku 2012) s celkovým elektrickým výkonem 200 MW a výrobou elektrické energie cca 200 GWh za rok [87].

Předpokládá se, že limitujícím faktorem pro další existenci velkochovů bude řešení problému likvidace odpadů. Jednou z technologií, která přichází v úvahu je právě anaerobní stabilizace v bioplynových stanicích. V České republice má rozvoj a aplikace této technologie v porovnání s jinými státy řadu předpokladů v podobě vysoké koncentrace živočišné výroby, relativně dlouhých zkušeností s provozem bioplynových stanic, vývojové a výrobní základny [88]. Současné, již částečně zastaralé aplikace jsou cenné, neboť:

- prokazují reálné možnosti získání cenově dostupné fermentovatelné biomasy,
- přispívají k obecnému povědomí zemědělců, zástupců obcí, techniků, ekonomů a učitelů o účelnosti energetického využívání biomasy,
- poskytují cenné zkušenosti provozovatelům, ekologům, úřadům a legislativcům,
- zájemci o stavbu těchto technologií nemusí pro základní zkušenosti do zahraničí.

Výroba bioplynu v bioplynové stanici je charakterizována zejména:

1) *Plynovým výkonem* – objemem bioplynu vyrobeným v 1 m³ pracovního objemu bioreaktoru za jeden den, nebo objemem bioplynu vyrobeným z 1 dobytčí jednotky (DJ). Plynový výkon se na zemědělských bioplynových stanicích zpracovávajících kejdu pohybuje od 0,5 do 1,3 m_N³.DJ⁻¹.den⁻¹

2) *Výnosem bioplynu* – celkovým množstvím bioplynu získaným z 1 kg substrátu během doby kontaktu. V praxi jsou výnosy bioplynu 0,17 až 0,64 m_N³/kg organické sušiny.

3) *Stupněm rozkladu* – procentuální částí substrátu, který se rozložil za dobu kontaktu. Stupeň rozkladu se obecně pohybuje v rozmezí od 25 do 75 %.

4) *Dobou kontaktu* – poměrem objemu bioreaktoru a denního dodávaného množství substrátu. Doba kontaktu se zkracuje s rostoucí pracovní teplotou. Při použití kejdy a pracovní teplotě 35 °C se doporučuje doba kontaktu 30 až 35 dní [89].

5) *Čistým výnosem bioplynu* – celkovým výnosem bioplynu zmenšeným o množství bioplynu potřebné pro výrobu tepla k vytápění bioreaktorů. Moderní bioplynové stanice dosahují čistého výnosu bioplynu 65 až 70 %.

6) *Složením bioplynu* – především procentuálním zastoupením metanu (obvykle 50 až 75 % obj.).

V tabulce 15 jsou uvedeny základní údaje o zprovozněných bioplynových stanicích v ČR [39], [41], [90].

Tabulka č. 15: Bioplynové stanice v ČR

Místo	Zahájení provozu	Základní substrát / kosubstrát [m ³ /den]	Doba zdržení [den]	Objem bioreaktorů [m ³]	Teplota [°C]	Produkce bioplynu [m ³ .den ⁻¹]	Investiční náklady [mil. Kč]	Využití bioplynu
Třeboň	1974	P/Č 200/40	16 - 26	3200 + 2800	39 - 41	4200	42	kogenerace
Kroměříž	1985	P/Č 180/100	-	2 x 980, 2 x 3500	35 - 40	3800	-	výroba tepla
Hustopeče	1986	S 35 tun	32	8 x 169	35 - 40	1000 - 1200	8,5	výroba tepla
Výšovice	1987	S, 11 tun	30	6 x 110	35 - 40	300 - 400	3,5	výroba tepla
Kladruby	1989	P/S 100/-	26	2 x 1020	39 - 41	2200 - 2500	36	kogenerace
Jindřichov	1989	S 21 tun	28	6 x 85	35 - 40	600	5,5	kogenerace
Plevnice	1991	P/D 70/10	22	2 x 500, 2 x 600	49	1600 - 2400	14	kogenerace
Skalice	1993	P 170	23	2 x 2160	42 - 44	2700	48	kogenerace
Šebetov	1993	P 120	-	2 x 2000	39 - 41	2000	-	kogenerace
Trhový Štěpánov	1994	P/H 10/10, J	-	700	42 - 44	1000	18	kogenerace
Mimoň	1994	P/K 120/-	-	2 x 1800	42 - 45	3500	-	kogenerace
Velké Albrechtice	1995	P 140-200, Dř, M, B	35	2 x 2500	32 - 38	5000 - 6000	-	kogenerace
Slavkov u Brna	1998	S 19 tun	-	6 x 110	35 - 40	100	6	kogenerace
Letohrad	2004	H 20	-	1250	39 - 40	570	-	kogenerace
Velký Karkov	2006	P/ H 200	-	8 x 1300	37 - 39	15000	107	kogenerace
Velké Albrechtice II	2006	P/Dř, M	35	2500	37 - 42	3000	-	kogenerace
Klokočov	2006	B, M	-	2 x 2500	-	-	70	kogenerace
Kněžice	2006	P/D, Po, Ž 35	-	2500	40	3000	-	kogenerace
Chroboly	2007	H, S, B	-	-	38	-	-	kogenerace
Pustějov	2007	H, P, M, B	-	2 x 2100	40	-	-	kogenerace

Poznámka: P – prasečí kejda, H – hovězí kejda, S - slamnatý hnůj (chlévká mrva), D - drůbeží trus, Č - čistírenský kal, K – kuchyňské odpady, J – jateční odpady, Dř – dřevní kal, M – masokostní moučka, Po – potravinářské odpady, Ž – odpad ze septiků a žump, B – jiné biologicky rozložitelné odpady.

4.1.1 Využití bioplynu

Mezi hlavní způsoby využití bioplynu patří:

- přímé spalování a ohřev teplotnosného média (např. topení, sušení, chlazení, vaření);
- výroba elektrické energie a ohřev teplotnosného média (kogenerace);
- výroba elektrické energie, tepla a chladu (trigenerace);
- palivo pro pohon mobilních energetických prostředků;
- neenergetické využití bioplynu (chemická výroba sekundárních produktů z bioplynu) [41].

Například ve Spojených Státech je využití bioplynu pro výrobu elektrické energie za pomoci kogenerace či mikroturbin běžnou záležitostí venkova [90], [91]. Za současných podmínek na trhu s energiemi v ČR (dle Rozhodnutí Energetického regulačního úřadu 8/2006, dostupného na www.eru.cz) [92] lze reálně uvažovat s využitím bioplynu pro výrobu tepla resp. technologické páry (spalování v kotli) nebo pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (kogenerační jednotka).

Běžným způsobem využití přebytku tepla je otop, ohřev užitkové vody, sušení fermentátu či temperování skladů v areálu bioplynové stanice. Pokud jsou tyto odběry malé nebo pouze sezónní, je potřeba hledat další řešení např. v dodávkách tepla jiným odběratelům. V současnosti nejrozšířenějším způsobem využití bioplynu je kogenerace. Kogenerační jednotky využívají bioplyn na kombinovanou výrobu elektrické energie (cca 35 % celkové energie) a tepla s vysokou účinností až 90 %. Spalovací motor na bioplyn pohání generátor elektrické energie a zároveň se využívá teplo z chladicího média motoru, popř. tepla ze spalín. Část tepla se využívá k vytápění bioreaktoru. Perspektivním způsobem využití bioplynu je trigenerace. Kogenerační jednotka je zde doplněna absorpčním tepelným konvertorem pro výrobu chladu. Pro pohon mobilních energetických prostředků musí být bioplyn odsířen, zbaven mechanických nečistot a energeticky zhodnocen nad úroveň odpovídající 90 % CH₄. Ve Švédsku jsou nově zkoušeny možnosti takto upravený bioplyn dodávat do rozvodů zemního plynu, ale tento způsob zužitkování bioplynu nemá v ČR zatím oporu v legislativě [41]. Hospodárnost takového využití bioplynu by byla díky nákladnosti oddělení vlhkosti, sirovodíku a oxidu uhličitého zaručena teprve výrobou 50 m³ bioplynu za hodinu [9].

4.1.2 Využití digestátu

Kapalný produkt anaerobní digesce v bioplynových stanicích (tzv. digestát či fermentát) je využíván jako hnojivo na zemědělských pozemcích, přičemž jeho hlavní výhodou oproti surové kejdě je snížený zápach a nižší rozšiřování plevelů. V současné době úspěšnému uplatnění digestátu na trhu hnojiv brání především jeho relativně vysoká cena a náročnost aplikace ve srovnání s průmyslovými hnojivy. Digestát lze odvodnit a odvodněný substrát kompostovat nebo po dosušení spalovat. Tento druh využití je obecně málo častý. Z procesní vody – fugátu lze stripováním odstraňovat amoniak a z něj jímáním v kyselině dusičné vyrábět hnojivo dusičnan amonný. S tímto způsobem využití digestátu je možno počítat spíše ve větším měřítku, jinak mu brání nízká ekonomičnost. Aerobně dočistěnou vodu lze vypouštět do vodoteče.

4.2 Rozvoj anaerobních technologií v ČR

4.2.1 Přínosy anaerobní fermentace pro životní prostředí

Řízená anaerobní fermentace biomasy, spojená s výrobou bioplynu a jeho následným energetickým využitím má velmi pozitivní vliv na životní prostředí [93]. Vzniklý bioplyn je obnovitelné palivo, jehož energetické využití je z pohledu bilance oxidu uhličitého neutrální a tím se omezuje antropogenní nárůst skleníkového efektu [17]. Omezí se také šíření choroboplodných zárodků a semen plevelů. Stejně tak se zamezí značným pachovým emisím a šíření mikroorganismů a hmyzu. Rovněž se zamezí úniku velmi významného skleníkového plynu – metanu do atmosféry. Významným faktorem majícím vliv při rozhodování mezi aerobní a anaerobní technologií je podnebí. Anaerobní technologie by měly mít přednost zejména v teplejších oblastech [94]. Environmentálním problémem jsou letní přebytky bioplynu v městských čistírnách odpadních vod. Anaerobní fermentace je v kontextu trvale udržitelného rozvoje velmi důležitou technologií. Proces může zabezpečit ekologické palivo pro výrobu tepla, elektrické energie i provoz mobilních zařízení. Je možné předpokládat, že anaerobní digesce biomasy bude ve třetím tisíciletí součástí akumulárních biotechnologických cyklů propojených s dalšími systémy ekologické výroby energie.

4.2.2 Legislativní podpora

Národní program nakládání s energií a využívání obnovitelných a druhotných energetických zdrojů, který je naplněním Zákona č. 406 Sb. o hospodaření energií z října 2000 [95], počítá se zvýšením podílu obnovitelných energií na celkové energetické spotřebě ze současných 2,2 % na 3 až 6 % do roku 2010, přičemž se uvažuje se ztrojnásobením energetického využívání biomasy včetně bioplynu. Plán odpadového hospodářství České republiky předpokládá do roku 2010 snížení množství skládkovaných komunálních odpadů (BRKO) na 75 % celkové hmotnosti r. 1995. Budování bioplynových stanic je součástí tohoto plánu [79]. V celé České Republice je potenciál pro využití anaerobní fermentace na řádově několika stech místech. Půjde zejména o zemědělské bioplynové stanice zpracovávající zvířecí fekálie s přídavky až 50 % travní hmoty nebo biologického podílu komunálních odpadů [96]. Výroba bioplynu se pozvolna stává významným přídatným odvětvím zemědělství vedle rostlinné a živočišné výroby a vedle výroby pevných biopaliv a bionafty [97].

Přes zlepšující se podmínky Česká Republika stále výrazně zaostává ve využívání anaerobní fermentace za většinou států Evropské unie. Státní program na podporu úspor energie a využívání obnovitelných zdrojů energie stanovil podmínky podpory pro výstavbu bioplynových stanic. Výše veřejné podpory činí 30 % celkových nákladů formou dotace a 23,25 % nákladů jako bezúročná půjčka s dobou splatnosti 12 let a odkladem splácení 2 roky; spolu s garantovanou výkupní cenou elektrické energie se jeví tyto podmínky jako přijatelné a téměř srovnatelné se státy, kde budování bioplynových stanic značně pokročilo [98]. Výstavba zemědělských bioplynových stanic patří mezi první investice, pro které se otevírá podpora z nového Programu rozvoje venkova. Program podpory Ministerstva průmyslu a obchodu poskytuje podporu až 50 % (maximálně 30 mil. Kč).

Základním problémem, kvůli němuž v současné době nevzrůstá zájem o výrobu bioplynu je příliš velký počet právních norem a předpisů, jimž bioplynové stanice podléhají. Mezi tyto předpisy patří zejména zákony týkající se ochrany životního prostředí, nakládání s odpady, hospodaření s energií a aplikace hnojiv. Přinejmenším kvalitativně nejednoznačný a komplikovaný text předpisů, připouštějící různý výklad a aplikaci, je dostatečným faktorem demotivace potenciálních investorů [99], [100]. Důvodem váhání investorů při volbě technologie jsou rovněž vysoké investiční náklady na bioplynovou stanici zejména v důsledku faktu, že vlivem rozmanitosti vstupních surovin a umístění v krajině je každý projekt vlastně originálem. Na druhou stranu bioplynové stanice jsou potenciálně flexibilními zařízeními, schopnými snadného přizpůsobení se změnám u dodavatelů.

4.2.3 Podmínky výkupu elektrické energie z bioplynu

Povinnost výkupu elektřiny ze všech druhů obnovitelných zdrojů energie zavádí Energetický zákon č. 458/2000 Sb. v platném znění [100]. Výkupní ceny elektrické energie a další podmínky jsou definovány vždy na 1 rok Cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu, kterým se stanovují ceny elektřiny a souvisejících služeb [92]. Dosud platí sazba za výkup elektrické energie z obnovitelných zdrojů pro spalování bioplynu z bioplynových stanic 3040,- Kč/MWh a zelený bonus 1920,- Kč/MWh (pro rok 2007).

Podmínky výkupu elektrické energie vyrobené z bioplynu se mohou v budoucnu výrazně měnit, proto je při zpracování ekonomického záměru bioplynové stanice účelné zvažovat více variant, jak docílit dobrých ekonomických ukazatelů. Konkurenceschopnost bioplynu bude stoupat se zvyšujícími se cenami energií a environmentálními požadavky. Využití tepelné energie, které vzniká u současných kogeneračních technologií někdy až dvojnásobné množství oproti elektrické energii, je potřeba navrhovat vzhledem k místním podmínkám. Bioplynová stanice se suchým anaerobním procesem spotřebuje cca 5 % až 10 % vyrobeného tepla pro technologické ohřevy. V případě mokrých anaerobních procesů je vlastní spotřeba tepla podstatně vyšší, neboť je potřeba ohřívat značné objemy procesní vody. Spotřeba vyrobeného tepla se zde pohybuje v rozmezí 30 % až 60 % [79], [101].

5 MOŽNOSTI OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ ANAEROBNÍHO PROCESU NA ZEMĚDĚLSKÉ BIOPLYNOVÉ STANICI

Optimalizace řízení mokrého anaerobního procesu na zemědělské bioplynové stanici je teoreticky realizovatelná po identifikaci jejího stávajícího chodu a způsobu řízení anaerobního procesu, a po vyhodnocení dlouhodobějších procesních měření a sledování. Nástrojem k optimalizaci řízení anaerobního procesu se může stát návod určující, jaké změny vstupní směsi je potřeba provést, aby se procesní podmínky v bioreaktoru stabilizovaly na žádané hodnoty a bioreaktor produkoval žádané množství kvalitního bioplynu. Předpoklady k tomuto lze v jednodušší podobě získat při již zmíněných dlouhodobějších procesních měřeních a sledováních.

Vhodnější variantou, jak získat návod na optimalizaci procesu je vytvoření počítačového programu pro řízení skladby vstupní směsi, který je možno sestavit na základě teoretického matematického modelu, respektujícího dosud poznané fyzikálně-chemické zákonitosti anaerobního procesu. Pro tvorbu matematického modelu je potřeba znát všechny relevantní informace o možných fermentovatelných materiálech. Tyto materiálové parametry lze získat rozsáhlým laboratorním výzkumem, prováděným na databázovaném souboru vzorků potencionálně anaerobně fermentovatelných materiálů. Pro obě naznačené cesty je významná znalost současné praxe mokré technologie anaerobní kofermentace na skutečném díle, pracujícím s neměnným režimem již řadu let.

5.1 *Výroba bioplynu v zemědělské bioplynové stanici společnosti GT 92, s.r.o.*

Pro tento účel, tj. pro získání základních znalostí o současném chodu anaerobního procesu na úspěšně pracujícím díle a pro ověření možností optimalizace tohoto procesu byla navázána spolupráce s firmou GT 92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích, která provozuje zemědělskou bioplynovou stanici v prostorách své chovné farmy prasat již celé desetiletí [102]. Posouzení současného stavu, při němž technologie bioplynové stanice a kogeneračních jednotek pracuje, bylo výchozím bodem pro záměr experimentálního ovlivnění anaerobního procesu s cílem zvýšení produkce bioplynu a elektrické energie cestou úprav procesních podmínek, k němuž bylo přistoupeno v pozdější fázi výzkumu.

5.1.1 Popis bioplynové stanice společnosti GT 92, s.r.o. Velké Albrechtice

Bioplynová stanice ve velkovýkrmně prasat ve Velkých Albrechticích byla uvedena do provozu v roce 1993. Tato bioplynová stanice využívá pro anaerobní proces prasečí kejdu vlastní produkce (z farmy chovných prasat), do níž jsou za účelem zvýšení obsahu sušiny přidávány mimo jiné kaly z celulózky i masokostní moučka (MBM). Denně se zde zpracovává 140 až 200 m³ surové prasečí kejdy o obsahu celkové sušiny 4 až 6 % hm. Průměrná denní spotřeba kalů a masokostní moučky činí 13 t. Vznikající bioplyn je odváděn dmychadly k šesti instalovaným kogeneračním jednotkám TEDOM Cento 150 SP BIO (každá o elektrickém výkonu 142 kW a tepelném výkonu 207 kW). Denní průměrná produkce bioplynu činí přes 5 000 m³. Bioplyn obsahuje průměrně 65 % metanu a přibližně 1500 mg/m³ sloučenin síry [102].

Využívány jsou obě dvě formy energie získané kogenerací. Vyprodukovaná činná elektrická energie je odváděna do sítě (malé množství elektrické energie pro potřeby provozu elektrických zařízení na farmě je ze sítě odebíráno). Tepelná energie (včetně tepla z chlazení) je využita pro vytápění prostor farmy a vytápění bioreaktorů. Měsíčně je do rozvodné sítě odvedeno až 330 MWh elektrické energie. Schéma bioplynové stanice je uvedeno na obrázku 3.

5.1.2 Používaná technologie

Produkce kejdy

Farma chovných prasat produkuje kejdu o obsahu celkové sušiny 3 až 5 % hm. Množství kejdy a obsah sušiny se mění zejména v závislosti na počtu ustájených kusů, jejich stáří, způsobu krmení a odklizení výkalů a četnosti výplachů vodou [102]. Veškerá produkce prasečí kejdy je odváděna potrubím do jímek, v nichž je kejda homogenizována pomocí míchadel. Homogenizovaná kejda je čerpána do dvoukomorové skladovací jímky o objemu 2 x 160 m³ [103]. Zde je udržována a neustále míchána přibližně dvoudenní zásoba kejdy. V případě příliš vysokého obsahu sušiny je možno kejdu mísit s digestátem. V současné době je zpracováváno až cca 200 m³/den kejdy (maximální zpracovatelné množství kejdy je 250 m³/den). Čerpání kejdy do jímky míchací probíhá v nepravidelných intervalech, obvykle každé dvě až čtyři hodiny. Obsah organických látek v sušině se pohybuje okolo 75 % hm. V případě nedostatku surové kejdy je bioplynová stanice připravena čerpat adekvátní množství digestátu (kapalný produkt anaerobního procesu), jenž stále obsahuje anaerobně rozložitelný organický podíl.

Zvyšování obsahu sušiny

Na počátku každé směny obsluha zjistí, jaké množství surové kejdy bylo během minulého dne vyprodukováno. Do míchací jímky je načerpáno takové množství kejdy, aby se předešlo jejímu nadměrnému hromadění ve skladovací jímce. Na toto množství kejdy byly projektovány používané bioreaktory. Kejda je ze sběrné jímky čerpána do jímky míchací (viz obrázek 4), v níž je zvyšován obsah sušiny pomocí přísad kalu (odpad z celulózky Biocel Paskov), respektive masokostní moučky 3. kategorie, dovážené z kafilérie REC, s.r.o. Odry v Mankovicích. Zvyšování obsahu sušiny substrátu (vstupní směsi) pomocí masokostní moučky je v souladu s předpisy Evropské unie (Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002 ze 3. října 2002) [52]. Za odstranění jedné tuny kalu firma GT 92, s.r.o. účtuje 300 Kč, za odstranění jedné tuny masokostní moučky neúčtuje nic. Anaerobní rozložitelnost kalu byla testována na VŠCHT - Praha [104]. Kal je snadno rozložitelný a poskytuje až 370 l bioplynu na 1 kg organické sušiny, což je na spodní hranici vydatnosti kalů čistírenských. Obsah celkové sušiny v masokostní moučce je okolo 97,5 % hm. [105]. Jak již bylo uvedeno výše, procesem anaerobní digesce lze zpracovávat pouze masokostní moučku II. a III. kategorie. Anaerobní zpracovávání nejrizikovější masokostní moučky (I. kategorie) je zakázáno.

Kal a masokostní moučka je dovážena dle pevně stanoveného harmonogramu (viz tabulka 16), sestaveného dle možností dodavatelů (provozovatel bioplynové stanice nemá skladovací prostory vyhovující současné legislativě).

Nákladní automobil dodavatele moučky či kalu je vážen plný a prázdný přímo u dodavatele (v případě kalu je dodavatelem Biocel Paskov a.s., v případě masokostní moučky je dodavatelem

REC Odry, s.r.o.). Kal a moučka nejsou před použitím skladovány, ale jsou ihned po příjezdu vyklápany do míchací jímky, která obsahuje nevyčerpaný zbytek předchozí směsi. Písemný zápis o množství dodaného materiálu je veden na vrátnici. Do jímky je dočerpán takový objem surové kejdy, který přibližně odpovídá předpokládanému objemu směsi potřebné pro čerpání do bioreaktorů po dobu, než bude dovezen materiál pro novou směs. Časový interval pro dostatečnou homogenizaci směsi je dle dosavadních zkušeností obsluhy minimálně 1,5 hodiny. Vrtulové míchadlo v jímce je v chodu neustále. V okamžiku nutnosti rychle dodat směs do bioreaktorů je čerpána i nedostatečně homogenizovaná a tedy i na sušinu chudší směs.

Anaerobní fermentace v bioreaktorech

Homogenizovaná směs je čerpána do dvou shodných bioreaktorů, v nichž probíhá anaerobní digesce za vzniku bioplynu a digestátu. Každý reaktor (viz obrázek 5) je dimenzován na 2500 m³ směsi. Jedná se o směšovací bioreaktory „prázdného typu“, tedy reaktory v nichž je biomasa nesena na reagujícím substrátu. Každý bioreaktor má vnější a vnitřní reakční prostor. Čerstvá směs je čerpána do horní části vnějšího prostoru a po načerpání krátce rozmíchána se stávající náplní reaktoru pomocí míchadla umístěného u dna. Vznikající bioplyn vytlačuje směs z vnějšího prostoru do prostoru vnitřního (dokvašovací komory), v němž je vyšší hladina směsi. Odplyněná směs (digestát) přepadává tlakem bioplynu z nejvyššího místa vnitřního prostoru reaktoru do sifonu. Rozdíl výšky hladin reakční směsi v bioreaktoru je maximálně 4,16 m, vypouštěcí přetlak bioplynu je značně vysoký (cca 42 kPa) [103]. Jedná se o bioreaktory mezofilní, je v nich proto udržována teplota reagující směsi v rozmezí 25 až 40 °C (průměrně 35 °C). Digestát je vytlačován přetlakem bioplynu průměrně po uplynutí 1 až 2 hodin od čerpání dávky vstupní směsi (dle povahy směsi).

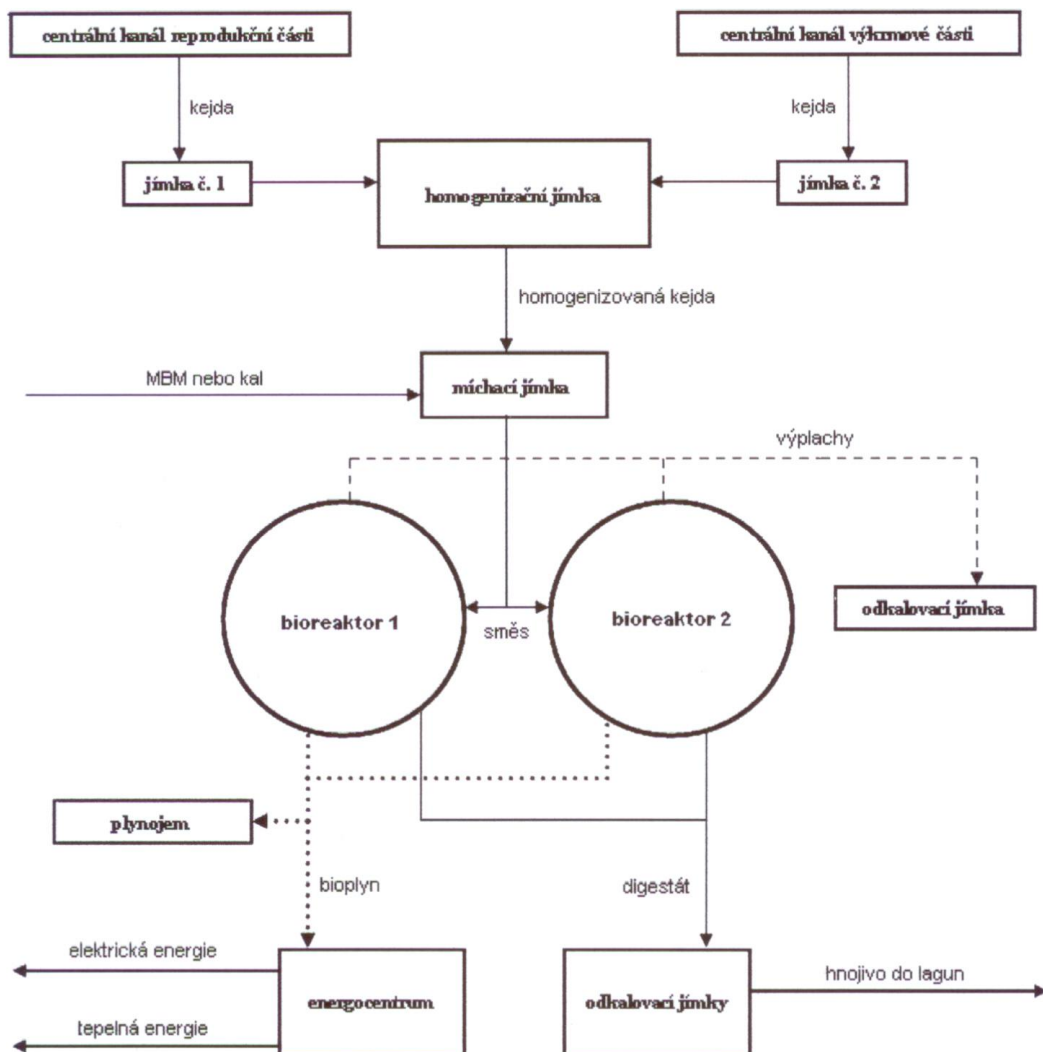
Čerpání směsi do reaktorů není prováděno pravidelně, ale v závislosti na momentální produkci a potřebě bioplynu. Je-li zapotřebí rychle zvýšit produkci bioplynu, čerpá se směs v kratších intervalech. Mimořádně, pokud nebyl přivezen kal nebo moučka, je jímka se zbylou směsí dodatečně doplněna kejdou. Příprava směsi a čerpání jsou prováděny na základě dosavadních zkušeností obsluhy. Obsah sušiny je tedy pouze odhadován. Minimální doba zdržení směsi v reaktoru je s ohledem na vlastnosti vznikajícího digestátu stanovena na 20 dní. V současnosti je průměrná doba zdržení směsi v zařízení 35 dní. Dle potřeby je prováděno odpouštění sedimentovaného podílu do kalové jímky. Bioplyn je odpouštěn přes zabezpečovací zařízení (přetlaková a podtlaková pojistka a odvod kondenzátu) do zásobního suchého plynojemu a z něj je odváděn pomocí dmychadel ke kogeneračním jednotkám.

Výstupní kapalný produkt - digestát je stabilizovaný organo-minerální materiál s vysokým obsahem humusových látek, mající upotřebení jako hnojivo. Digestát v průběhu čerpání nové směsi přepadává do jímky, v níž dochází k odkalení. Dle potřeby je pak čerpán do utěsněných lagun (polní úložiště o kapacitě 15 000 m³) v centru hnojených pozemků. Nevzniká tedy žádný nevyužitelný biologický odpad [105].

Úprava bioplynu

Bioplyn nasycený vodní parou při nízkých teplotách a nízkém tlaku nese s sebou značná množství vlhkosti, která ztěžuje jeho další využití [106]. Před spalováním je vlhkost bioplynu

snížena. K odvodnění dochází při ochlazení bioplynu na teplotu okolí v plynojemu a třech kapacích zařazených v plynovém potrubí. Technologie odsiřování bioplynu není zařazena.



Obr. 3: Blokové schéma technologie výroby bioplynu v závodu GT 92, s.r.o.



Obr. 4: Míchací jímka



Obr. 5: Bioreaktory 2 x 2500 m³

Tabulka č. 16: Týdenní řád dovozu masokostní moučky (MBM) a dřevního kalu

Den	Ranní dovoz (mezi 8 ⁰⁰ až 9 ⁰⁰)	Odpolední dovoz (mezi 12 ⁰⁰ až 13 ⁰⁰)
PONDĚLÍ	Dřevní kal	MBM
ÚTERÝ	MBM	MBM
STŘEDA	Dřevní kal	MBM
ČTVRTEK	MBM	MBM
PÁTEK	Dřevní kal	MBM
SOBOTA	Dřevní kal	Dřevní kal
NEDĚLE	Dřevní kal	Dřevní kal

Výroba elektrické energie a tepla

TEDOM Cento T150 SP BIO shodného provedení je elektronikou automaticky řízen na rovnoměrné výrobě elektrické energie, tedy tak, že veškerá produkce bioplynu je neustále využívána a nevznikají přebytky bioplynu (instalovaný plynem plní jen pojistnou funkci). Kogenerační jednotky spalují bioplyn pomocí pístového spalovacího motoru konstruovaného pro plynná paliva, odolného sloučeninám síry. Motor roztáčí generátor. Teplo motoru, oleje a spalín je efektivně využíváno. Chladicí obvody odvádějí podstatnou část reakčního i provozního tepla [107]. Pro vytápění bioreaktorů je potřebný hodinový tepelný výkon odpovídající přibližně hodinovému tepelnému výkonu jedné kogenerační jednotky (přibližně 200 kW). Zbytkem tepla jsou vytápěny prostory prasečí farmy. Vyrobena činná elektrická energie je monitorována elektronikou a je možno ji odečítat z počítadel jednotlivých jednotek. Nejdůležitější technické parametry jednotky Cento T150 SP BIO jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka č. 17: Technické parametry kogenerační jednotky TEDOM Cento T150 SP BIO

Elektrický výkon [kW]	Tepelný výkon [kW]	Spotřeba bioplynu [m ³ /h]	Elektrická účinnost [%]	Tepelná účinnost [%]	Celková účinnost [%]
142	207	65,2	33,5	48,8	82,3

5.2 Identifikace stávajícího chodu bioplynové stanice

Pro účely identifikace stávajícího průběhu a technologického postupu výroby bioplynu ve firmě GT 92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích bylo navrženo provozní měření respektive sledování, během něhož byly koncem roku 2004 v průběhu devíti provozních dní sledovány a měřeny parametry nezbytné k sestavení materiálové bilance procesu, odpovídající běžné provozní technologii.

5.2.1 Ověřovací provozní měření (rok 2004)

Pro zhodnocení efektivity funkce bioreaktorů a produkce elektrické energie bylo uskutečněno provozní měření za běžného chodu technologie. Měření bylo realizováno v prosinci 2004 a to v průběhu devíti provozních dnů od čtvrtku dne 2.12. 2004 9⁰⁰ hodin do pátku dne 10.12. 2004 21⁰⁰ hodin. Ověřovací provozní měření zahrnovalo:

A. Měření množství dílčích surovin a celkové vsázky, vstupující do bioreaktoru:

a) Hmotnosti dílčích surovin (MBM a kalu)

- zjišťováno ze zápisu o vážení plných a prázdných automobilů na vrátnici;
- čas zápisu hmotnosti vrátným (je o cca 15 minut opožděn oproti času vyklopení suroviny do jímky);
- údaje shrnuty v tabulce 18 a graficky v příloze 1 B.

b) Objem vstupní směsi čerpané do bioreaktorů

- převzat ze zápisů obsluhy bioreaktorů;
- časový údaj odpovídá počátku čerpání zahuštěné směsi v 1. či 2. směně;
- zaznamenán je objem vstupní směsi, čerpané do každého z bioreaktorů během směny;
- údaje shrnuty v tabulce 18 a graficky v příloze 1 C.

B. Měření množství vzniklého bioplynu a vyrobené činné elektrické energie

a) Objem vyrobeného bioplynu

- odečítán z hlavního plynoměru za dmychadly na začátku každé hodiny;
- objem přepočten na normální podmínky (101,325 kPa, 0°C);
- údaje shrnuty tabulkově v příloze 1 A a graficky v příloze 1 E.

b) Vyrobená činná elektrická energie

- odečítána z jednotlivých elektroměrů všech pracujících jednotek;
- odečet prováděn na začátku každé hodiny;
- údaje shrnuty tabulkově v příloze 1 A a graficky v příloze 1 H.

C. Měření složení bioplynu:

a) Obsah CH₄

- určen jednak jako dopočet do sta procent na základě známého obsahu CO₂ měřeného analyzátozem TESTO T330 (shrnuje tabulkově v příloze 1 A a graficky v příloze 1 F);
- měřen infračerveným analyzátozem Infralyt DUO CH₄ v minutových intervalech od 8.12.2004, 13¹⁵ hodin do 10.12.2004, 9⁵⁵ hodin;
- hodnoty naměřené Infalytem byly shledány málo věrohodnými, proto byla uvedena pouze průměrná hodnota v tabulce 20, tuto hodnotu je nutno považovat pouze za orientační.

b) Obsah CO₂

- měřen elektrochemickým analyzátozem TESTO T330 na začátku každé hodiny (shrnuje tabulkově v příloze 1 A a graficky v příloze 1 F);
- měřen analyzátozem Infralyt 4000 v minutových intervalech od 8.12.2004, 13¹⁵ hodin do 10.12.2004, 9⁵⁵ hodin (průměrná hodnota za celou dobu měření je uvedena v tabulce 20).

c) Obsah O₂

- měřen analyzátozem TESTO T330 na počátku každé hodiny do poruchy kyslíkové sondy, která nastala 6.12.2004 v 8⁰⁰ hodin. Výsledky nebyly použity z důvodu častého výskytu záporných hodnot;

- měřen analyzátozem Infralyt 4000 v minutových intervalech od 8.12.2004, 13¹⁵ hodin do 10.12.2004, 9⁵⁵ hodin (průměrná hodnota za celou dobu měření je uvedena v tabulce 20).

d) Obsahy CO, C_xH_y

- měřeny analyzátozem Infralyt 4000 v minutových intervalech od 8.12.2004, 13¹⁵ hodin do 10.12.2004, 9⁵⁵ hodin;
- průměrná hodnota obsahu CO je uvedena v tabulce 20;
- překročen měřicí rozsah pro C_xH_y (10 000 ppm), hodnoty nebyly pro vyhodnocení použity.

e) Obsahy NO, SO₂

- měřeny analyzátozem Infralyt 50 v minutových intervalech od 8.12.2004, 13¹⁵ hodin do 10.12.2004, 9⁵⁵ hodin;
- překročen měřicí rozsah pro SO₂ (5 000ppm), hodnoty nebyly použity;
- průměrná hodnota obsahu NO je uvedena v tabulce 20.

Teplota bioplynu a okolního prostředí v hale byly měřeny na počátku každé hodiny měření.

D. Odběr vzorků na analýzu

a) Vzorky vstupní směsi

- pro účely stanovení obsahu sušiny byly odebírány z homogenizační jímky vždy před začátkem čerpání do bioreaktorů (celkem bylo odebráno 36 vzorků);
- odběr proveden pětilitrovou nádobou, směs uchována v cca 100 ml plastové nádobce;
- hodnoty obsahu sušiny ve vstupní směsi (stanoveny na přístroji LECO-TGA 601) jsou shrnuty v tabulce 19 a graficky zpracovány v příloze 1 D.

b) Vzorky směsi po anaerobní digestci (vzorky digestátu)

- odebírány pro účely chemické a mikrobiální analýzy;
- odběr proveden z bioreaktoru plastovou nádobou, odebrané množství cca 1,5 l;
- protokoly o provedených analýzách jsou uvedeny v příloze 1 I;
- výsledky analýz jsou shrnuty v tabulkách 22 a 23.

Měřicí přístroje

Pro měření jednotlivých plynných složek v bioplynu byly použity tři infraanalyzátory typu NDIR (Nuclear Detector Infra-Red). Měření infračervenými analyzátory bylo provedeno v průběhu tří dnů, tj. od 8.12.2004 od 13¹⁵ hod do 10.12.2004, 10¹⁵ hodin. Vyčištění bioplynu obstarávala připravená odběrová trasa, společná pro všechny tři analyzátory. Pro odběr vzorku bioplynu byl použit uzavírací plynový ventil, umístěný na hlavním přívodním potrubí ke kogenerační jednotce č. 6. Grafické zpracování naměřených výsledků je uvedeno v příloze 1.

Měřicí rozsahy a chyby měření použitých přístrojů:

Infralyt DUO CH₄: CH₄ = 0 až 100 % obj.; chyba měření ±2 %

Infralyt 4000: CO = 0 až 10 % obj.; chyba měření ±2 %; CO₂ = 0 až 15% obj.;

C_xH_y (C₃H₈) = 0 až 10 000 ppmv; O₂ = 0 až 21 % obj.

Infralyt 50:	NO = 0 až 5 000 ppmv; SO ₂ = 0 až 5 000 ppmv
TESTO T330:	CO ₂ = 0 až 40 % obj.; chyba měření ±2 %; SO ₂ = 0 až 5000 ppmv; CO = 0 až 10000 ppmv; O ₂ = 0 až 25 % obj.

5.2.2 Vyhodnocení výsledků měření

5.2.2.1 Obsah sušiny ve vstupní směsi

Obsah sušiny ve vstupní směsi závisí na skutečně dovezeném množství MBM a kalu (viz tabulka 18) a na příslušných časech počátku čerpání směsi do reaktoru, které se přibližně kryjí s časy dovozu MBM a kalu a s časy odběru vzorků.

Stanovení obsahu celkové sušiny bylo provedeno termogravimetrickou analýzou na přístroji LECO TGA-601. Výsledky analýz obsahu celkové sušiny jsou shrnuty v tabulce 19. Obsah celkové sušiny v pravidelně odebíraných vzorcích vstupní směsi se v průběhu měření pohyboval od 5,5 % hm. do 15,6 % hm. Průměrně bylo ve vzorcích vstupní směsi 10,37 % hm. sušiny. Z krátkodobého hlediska lze pozorovat pokles obsahu sušiny v ranních a večerních hodinách, výjimku tvoří pouze pátek 3.12. Maximální obsahy sušiny odpovídají vzorkům odebraným kolem poledne.

Z dlouhodobějšího hlediska pravděpodobně dochází k poklesu obsahu sušiny o víkendech, přičemž opětovný nárůst významněji nastává pravděpodobně až v úterý (běžně není pokles tak veliký, neboť v neděli 5.12. nebyla dovezena pravidelná odpolední dávka kalu; za normálních okolností by obsah sušiny byl v pondělí kolem 9 % hm.).

5.2.2.2 Kvantita a kvalita vyrobeného bioplynu

Množství bioplynu odváděného ke kogeneračním jednotkám bylo měřeno hlavním plynoměrem umístěným za dmychadly bioplynu. Zaznamenané hodinové objemy vyrobeného bioplynu během devítidenního měření odpovídaly průměrnému tlaku v potrubí 2,75 kPa. Po přepočtu na normální podmínky byla hodinová produkce bioplynu v rozmezí od 125 m_N³ do 345 m_N³ (0 °C; 101,325 kPa). Průměrně bylo produkováno 208,43 m_N³ za hodinu. Minimum produkce odpovídá pondělí, úterý a středě na rozhraní 1. a 2. směny. Srovnáním rozptylu hodnot V_N u obou pátečních dnů v průběhu měření lze nalézt periodicitu. Pátek je zřejmě jedním z dní, ve kterých je produkce plynu relativně ustálená. Po dobu celého víkendu je produkce ustálená, což souvisí se skutečností, že je přidáván pouze kal. Největší znatelné změny v produkci bioplynu proběhly od pondělí do středy. Téměř každý den bylo množství bioplynu v poslední měřené hodině (devět hodin večer) ustáleno na průměrné hodnotě.

Obsah CO₂ měřený po dobu devíti dní elektrochemickým analyzátozem TESTO T330 se pohyboval v rozmezí od 28,5 % obj. do 39,5 % obj. Předpokládáme-li, že kromě metanu a oxidu uhličitého je v bioplynu významně zastoupen pouze kyslík v množství do 1 % obj., pohyboval se obsah metanu (dopočtený do sta procent objemových) na hodnotě 59,5 % obj. do 70,5 % obj. Obsah kyslíku v bioplynu byl stanoven jako průměrná hodnota na základě kontinuálního měření prováděného od středy 8.12.2004 do pátku 10.12.2004; stanovený průměrný obsah (aritmetický průměr) kyslíku je 0,821 % obj.

Tabulka č. 18: **Množství vstupních surovin a vstupní směsi* čerpané do bioreaktorů**

Den měření	MBM [kg]			KAL [kg]			SMĚS [m ³]		
	Čas	Dovezeno	Celkem	Čas	Dovezeno	Celkem	1. směna	2. směna	Celkem
ČT 2.12.04	8:15	7940	16200				120	100	220
	12:00	8260							
PÁ 3.12.04			7550	7:10	19880	19880	6080	100	160
	12:10	7550							
SO 4.12.04				7:50	17060	37220	100	9060	190
				11:55	20160				
NE 5.12.04				6:55	17180	17180	90	90	180
PO 6.12.04			8500	9:00	15460	15460	80	80	160
	15:00	8500							
ÚT 7.12.04	7:00	7820	15670				8040	8040	160
	12:30	7850							
ST 8.12.04			8070	8:30	17140	17140	90	60	150
	12:05	8070							
ČT 9.12.04	7:10	7720	15550				60	80	140
	13:50	7830							
PÁ 10.12.04			8448	7:20	19340	19340	80	80	160
	13:00	8448							

Poznámka: *Jedná se o směs v míchací jímce, odkud vstupuje do bioreaktorů (obsahuje kejdu a kal, alternativně kejdu a MBM nebo kejdu, kal a MBM).

Obsah metanu měřený v době od středy 8.12.2004 do pátku 10.12.2004 infračerveným analyzátozem typu Infralyt DUO CH₄ se pohyboval v rozmezí od 52 % obj. do 57 % obj., což jsou hodnoty poměrně nízké (spodní hranice běžně udávaného rozmezí). Sečteme-li průměrný obsah CO₂ měřený souběžně ať již analyzátozem TESTO T330 (34 % obj.), nebo analyzátozem Infralyt 4 000 (25 % obj.) s obsahem CH₄ měřeným Infralytem DUO CH₄ (55 % obj.), nerovná se součet sta procentům. V prvním případě dává součet 89 % obj. a ve druhém případě jen 80 % obj. Průměrné složení bioplynu je uvedeno v tabulce 20.

Tabulka č. 19: **Obsah celkové sušiny ve vzorcích vstupní směsi**

Číslo vzorku	Den a čas odběru	Obsah celkové sušiny ve vzorku [% hm.]	Průměrný obsah sušiny za 1.směnu [% hm.]	Průměrný obsah sušiny za 2.směnu [% hm.]	Průměrný obsah sušiny za den [% hm.]
1	ČT 2.12.04 10:30	10,38	13	11,6	12,3
2	2.12.04 14:15	15,62			
3	2.12.04 18:00	11,59			
4	2.12.04 19:45	11,60			
5	PÁ 3.12.04 9:00	10,80	10,37	13,02	11,43
6	3.12.04 11:30	10,27			
7	3.12.04 12:30	10,05			
8	3.12.04 17:45	12,68			
9	3.12.04 20:00	13,35			
10	SO 4.12.04 8:45	10,83	10,05	9,77	9,94
11	4.12.04 11:45	8,37			
12	4.12.04 13:00	10,94			
13	4.12.04 17:00	9,91			
14	4.12.04 19:30	9,63			
15	NE 5.12.04 9:15	8,83	8,68	8,45	8,57
16	5.12.04 12:15	8,53			
17	5.12.04 17:30	8,82			
18	5.12.04 19:00	8,08			
19	PO 6.12.04 8:00	5,49	6,33	6,87	6,6
20	6.12.04 10:30	7,16			
21	6.12.04 15:45	6,98			
22	6.12.04 16:30	6,75			
23	ÚT 7.12.04 7:30	9,68	9,93	9,78	9,86
24	7.12.04 11:00	10,18			
25	7.12.04 15:00	10,11			
26	7.12.04 19:00	9,45			
27	ST 8.12.04 9:30	13,06	14,17	12,39	13,57
28	8.12.04 12:00	15,27			
29	8.12.04 20:00	12,39			
30	ČT 9.12.04 12:00	8,26	8,26	13,83	11,97
31	9.12.04 16:30	15,27			
32	9.12.04 21:00	12,39			
33	PÁ 10.12.04 11:00	12,67	12,99	7,32	10,16
34	10.12.04 12:00	13,31			
35	10.12.04 16:30	7,97			
36	10.12.04 18:00	6,67			

Poznámka: Průměrný obsah celkové sušiny ze všech analyzovaných vzorků vstupní směsi byl 10,37 % hm.

Jelikož výsledky všech v minulosti provedených rozborů bioplynu na této bioplynové stanici dokládají obsah CH_4 vyšší než 65 % obj. a obsah CO_2 cca 32 % obj., přičemž zároveň stanovený obsah N_2 nepřesahoval 1,2 % obj. a obsah O_2 byl zanedbatelný, nabízí se vysvětlení, že stanovení CH_4 a CO_2 provedená infračervenými analyzátory ve dnech 8.12.2004 až 10.12.2004 nejsou zcela přesná vlivem použitých přístrojů. Jiný (méně pravděpodobný) důvod nezvykle nízkých naměřených hodnot je možné hledat ve slabém zavzdušnění bioplynu ať již vlivem netěsností rozvodného potrubí nebo odběrové trasy. Této hypotéze ovšem neodpovídá naměřený obsah O_2 (pouhých cca 0,9 % obj.). Pravděpodobně ani tato plynná složka nebyla naměřena správně. Protože byl překročen měřicí rozsah pro oxid siřičitý (0,5 % obj.), lze předpokládat, že obsah sirovodíku byl v bioplynu po celou dobu měření dosti vysoký. Odpovídal tomu i intenzivní charakteristický zápach bioplynu.

Výkyvy koncentrací hlavních složek bioplynu ukazují na změny v procesu fermentace. Dle dosavadních zkušeností obsluhy se změny obsahu sušiny ve vstupní směsi projeví na produkci bioplynu s cca dvoudenním zpožděním, což je pozorovatelné i z grafického zpracování výsledků měření. Obsluha má tedy dostatečnou možnost realizovat vhodné úpravy, aby proces nebyl bržděn či zastaven, tedy, aby nedošlo k přetížení bioreaktorů [103].

Výhřevnost bioplynu (vypočtená pro normální podmínky z hodnot obsahu metanu v bioplynu) se v průběhu provedeného provozního sledování měnila v rozmezí od 21,3 do 25,3 MJ/m_N^3 , stoupat počala v sobotu, aby dosáhla maxima ve druhé směně v pondělí a následně opět klesala až do čtvrtku. Průměrná výhřevnost (23,01 MJ/m_N^3) je v souladu s hodnotou 23 MJ/m_N^3 udávanou v provozním řádu [103]. Změny hodnoty výhřevnosti odpovídají změnám obsahu metanu. Snižování objemu čerpané směsi od neděle do úterý mělo vyvážit účinek právě se zvyšující výhřevnosti na celkovou produkci energie. Hodnoty výhřevnosti byly použity pro sestavení grafu chemického tepla bioplynu v závislosti na čase (viz příloha 1G).

5.2.2.3 Množství vyrobené elektrické energie

Množství vyrobené celkové hrubé činné elektrické energie bylo získáno jako součet hrubé činné elektrické energie vyrobené jednotlivými kogeneračními jednotkami (měřeno na svorkách generátorů jednotlivých kogeneračních jednotek). Hodinová produkce celkové hrubé činné elektrické energie se pohybovala v průběhu měření od 400 do 700 kWh, přičemž minimum 196 kWh zaznamenané v pondělí dne 6.12.2004 po 12⁰⁰ hodin bylo způsobeno přerušením chodu všech jednotek na 40 minut z důvodu čištění plynového potrubí. Maximální hodinová produkce 824 kWh byla zaznamenána ve středu dne 8.12.2004 okolo poledne. Průměrná hodinová produkce celkové hrubé činné elektrické energie za celou dobu měření činila 549,87 kWh.

Tabulka č. 20: **Průměrné koncentrace plynných složek ve vyrobeném bioplynu**

CH_4	CO_2	O_2	CO	NO
[% obj.]	[% obj.]	[% obj.]	[% obj.]	[% obj.]
54,9	25,8	0,8	0,3	0,0

Poznámka: Měřeno NDIR analyzátory ve dnech 8.12.2004 až 10.12.2004. Naměřené složky tvoří celkem 81,9 % obj., proto jsou hodnoty brány pouze jako orientační.

Hodinové produkce bioplynu a elektrické energie jsou uvedeny v tabulce v příloze 1 A. V uvedené tabulce je rovněž uveden obsah oxidu uhličitého v bioplynu naměřený

elektrochemickým analyzátořem TESTO T330. Obsah metanu v bioplynu je uveden jako dopočet do 100 % obj.

5.2.2.4 Výsledná bilance systému

Celkové týdenní spotřeby vstupních suřovin a celkový objem vyrobeného bioplynu a množství vyrobené elektrické energie ve shodném období jsou shrnuty v tabulce 21 (do výpočtů byly zahrnuty hodnoty produkce bioplynu a elektrické energie v nočních hodinách, stanovené jako aritmetický průměr množství vyrobeného bioplynu resp. elektrické energie za časové období od poslední naměřené hodnoty daného dne do první naměřené hodnoty dne následujícího). Řád dovozu MBM a kalu dle tabulky 15 byl v průběhu měření dodržen s výjimkou vynechání dávky kalu ve 2. směně v neděli. Pokud vztáhneme produkci bioplynu na jednotku objemu současně čerpané vstupní směsi, vychází produkce bioplynu 29,26 m³ na 1 m³ vstupní směsi, respektive 4848,7 m³ za den. Průměrná produkce elektrické energie je 73,28 kWh na 1 m³ vstupní směsi, respektive 2,76 kWh na 1 m³ bioplynu, respektive 13 340 kWh/den.

Tabulka č. 21: Celková bilance bioplynové stanice za období jednoho týdne
(od čtvrtku 2.12.2004 10¹⁵ hodin do čtvrtku 9.12.2004 10¹⁵ hodin)

Parametr	Jednotka	Hodnota
Spotřeba masokostní moučky celkem	[kg]	55770
Spotřeba kalu celkem	[kg]	106880
Spotřeba vstupní směsi v 1. směně	[m ³]	560
Spotřeba vstupní směsi ve 2. směně	[m ³]	600
Spotřeba vstupní směsi celkem	[m ³]	1160
Průměrná denní spotřeba masokostní moučky	[kg/den]	9295
Průměrná denní spotřeba kalu	[kg/den]	21367
Průměrná denní spotřeba vstupní směsi v 1. směně	[kg/den]	80
Průměrná denní spotřeba vstupní směsi ve 2. směně	[kg/den]	86
Průměrná denní spotřeba vstupní směsi	[kg/den]	145
Produkce bioplynu za provozních podmínek	[m ³]	37042,0
Produkce bioplynu za normálních podmínek	[m ³ _N]	33941,1
Produkce bioplynu z jednotkového objemu vstupní směsi za provozních podmínek	[m ³ /m ³]	31,930
Produkce bioplynu z jednotkového objemu vstupní směsi za normálních podmínek	[m ³ _N /m ³]	29,260
Průměrná denní produkce bioplynu za provozních podmínek	[m ³ /den]	5063,3
Průměrná denní produkce bioplynu za normálních podmínek	[m ³ _N /den]	4848,7
Chemické teplo bioplynu přivedené do kogenerace za normálních podmínek	[MJ]	790852,6
Chemické teplo jednotkového objemu bioplynu za provozních podmínek	[MJ/m ³]	22,993
Chemické teplo jednotkového objemu bioplynu za normálních podmínek	[MJ/m ³ _N]	23,015
Chemické teplo bioplynu vyrobeného z jednotkového objemu vstupní směsi za norm. podmínek	[MJ/m ³ _N]	681,77
Produkce hrubé činné elektrické energie	[kWh]	93794,9
Produkce hrubé činné elektrické energie z jednotkového objemu bioplynu	[kWh/m ³]	2,760
Produkce hrubé činné elektrické energie z jednotkového objemu vstupní směsi	[kWh/m ³]	80,86
Denní produkce hrubé činné elektrické energie	[kWh/den]	13340
Produkce hrubé činné elektrické energie na jednotku přivedeného chemického tepla	[kWh/kWh]	0,420

Poznámka: V nočních hodinách, kdy nebylo zajištěno odečítání měřených hodnot (vždy od 20:00 hodin do 8:00 hodin následujícího dne), byly započteny hodinové přírůstky bioplynu resp. elektrické energie ve výši průměru poslední naměřené hodnoty daného dne a první naměřené hodnoty dne následujícího. Normální podmínky: 0 °C, 101,325 kPa.

5.2.2.5 Posouzení kvality digestátu

V průběhu ověřovacího provozního měření byly odebrány tři vzorky digestátu na výstupu z potrubí odvádějícího tento materiál do nadzemní jímky digestátu umístěné v areálu farmy. Digestát byl odebírán v množství cca 1,5 l. Stanovení rizikových prvků, látek a mikroorganismů u tří náhodně odebraných vzorků digestátu bylo provedeno Zdravotním ústavem se sídlem v Ostravě, Odborem hygienických laboratoří Karviná. Protokoly o chemickém a mikrobiálním složení analyzovaných vzorků jsou v příloze 2.

Z hlediska obsahu vybraných rizikových látek a prvků (viz tabulka 22) výstupní kapalný produkt kofermentace (digestát) vyhovuje požadavkům daným vyhláškou Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb. ve znění 504/2004 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, příloha č. 3 [108], pro použití na zemědělské půdě. Pro toto použití však z hlediska obsahu vybraných mikroorganismů nevyhovuje žádný ze tří analyzovaných vzorků digestátu. Každý vzorek překračuje mezní hodnotu alespoň u jednoho mikrobiálního kritéria (viz tabulka 23).

Obsah celkové sušiny v digestátu, stanovený před chemickými a mikrobiálními rozbory, byl:

- vzorek č. 18270 (odebrán dne 9.12.2004) 12,1 % hm.;
- vzorek č. 18271 (odebrán dne 10.12.2004) 7,4 % hm.;
- vzorek č. 18272 (odebrán dne 10.11.2004) 8,8 % hm.

Výstupní tekutý produkt fermentace obsahuje vysoký obsah celkové sušiny (průměrně 9,4 % hm.), což je 93 % hodnoty sušiny na vstupu. Toto zjištění je v rozporu s ústním sdělením vedení bioplynové stanice, jež předpokládá obsah sušiny v digestátu cca 4 % hm. Vysvětlení lze hledat v nízkém stupni konverze organických látek na bioplyn, případně v růstu nové biomasy během anaerobního zpracování [4].

V průběhu týdne od čtvrtku 2.12.2004 10¹⁵ hodin do čtvrtku 9.12.2004 10¹⁵ hodin bylo spotřebováno 1160 m³ vstupní směsi s průměrnou měrnou hmotností 1030 kg/m³ a obsahem celkové sušiny 10,16 % hm. Bylo tedy spotřebováno přibližně 1194,8 t vstupní směsi, respektive 1213,9 t sušiny. Vyrobeno bylo 39 941 m³ bioplynu o měrné hmotnosti 0,5 kg/ m³. Tomu odpovídá výroba 19970,6 kg bioplynu, tedy přibližně 1,67 % hmotnosti zpracované vstupní směsi, respektive 16,45 % hmotnosti zpracované sušiny. Vyrobeno bylo přibližně 11000 kg metanu, což odpovídá 9 % hmotnosti zpracované sušiny. Je zřejmé, že digestát, obsahující více než 98 % hmotnosti zpracovaných surovin, obsahuje značné množství organických látek, které by bylo možno při opětovném anaerobním procesu vedeném za změněných podmínek částečně zpracovat. S touto možností bioplynová stanice do budoucna počítá. Doposud však byl digestát pouze výjimečně přidáván jako recyklát do vstupní směsi v období nedostatku surové kejdy, a to nejvýše v množství 10 % hm.

Tabulka č. 22: **Porovnání naměřených a vyhláškou [108] stanovených mezních hodnot vybraných rizikových látek a prvků v digestátu**

Ukazatel	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	AOX	PCB
Hodnota mezní [mg/kg sušiny]	30	5	200	500	4	100	200	2500	500	0,6
Naměřená hodnota [mg/kg sušiny]										
vzorek 18270	<5	2,2	12	53	0,03	<5	<5	425	53	0,032
vzorek 18271	<5	4,5	21	103	0,26	6	<5	724	150	0,037
vzorek 18272	<5	3,2	15	90	0,11	10	<5	641	125	0,030
Stav	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Poznámka: Mezní hodnoty dle vyhlášky MŽP č. 382/2001 Sb., ve znění 504/2004 Sb., přílohy č. 3. Nejistota stanovení nepřesahuje 20 %.

Tabulka č. 23: **Porovnání naměřených a vyhláškou [108] stanovených mezních hodnot mikrobiálního složení digestátu**

Ukazatel	termotolerantní koliformní bakterie	enterokoky	rod Salmonela	Nález
Hodnota mezní [KTJ/g sušiny]	<10 ³	<10 ³	negativní nález	
Naměřená hodnota [KTJ/g sušiny]				
vzorek 18270	4,1x10 ⁶	4x10 ⁶	pozitivní nález	Salmonela Sg.1
vzorek 18271	5,1x10 ³	9,2x10 ⁵	negativní nález	Citrobacter freundii
vzorek 18272	<10 ¹	6,8x10 ⁴	negativní nález	-
Stav	vzorky 18270 a 18271 nevyhovují	nevyhovují	vz. 18270 nevyhovuje	

Poznámka: Mezní hodnoty dle vyhlášky Ministerstva životního prostředí ČR č. 382/2001 Sb. ve znění 504/2004 Sb., přílohy č. 4. KTJ – kolonie tvořící jednotku (základní soubor mikroorganismů).

5.2.3 Závěry z provedeného provozního měření

Detailně jsou postup měření a dosažené výsledky a jejich zhodnocení popsány ve zprávách [109, 110] a v publikacích [111, 112]. Z výsledků provedeného krátkodobého provozního měření lze usuzovat, že změnou složení vstupní směsi možno významně ovlivnit produkci elektrické energie. Čím rovnoměrnější je dodávání vstupních surovin do anaerobních bioreaktorů, tím plynulejší je i produkce bioplynu a v návaznosti i produkce elektrické energie. Z jednoho metru krychlového vstupní směsi bylo v období tohoto měření v prosinci 2004 (běžný provoz) vyráběno přibližně 34 m³_N bioplynu, tedy přibližně 23 m³_N metanu. Z jednoho normálního metru krychlového bioplynu bylo vyráběno 2,173 kWh hrubé činné elektrické energie, respektive odváděno do sítě 2,036 kWh činné elektrické energie.

Vlivem zvýšení obsahu masokostní moučky ve vstupní směsi došlo k nárůstu produkce bioplynu. Dřevní kal z celulózky se ukázal být méně vhodným pro anaerobní digesci, neboť jeho přítomnost produkci bioplynu mírně snižovala (pravděpodobně díky vysokému obsahu celulózy a vysokému pH). Z výsledků provedeného měření nebylo pro jeho krátkodobost možné provést jednoznačné posouzení možnosti ovlivnění chodu procesu změnou složení vstupní směsi (nerovnoměrností dodávek MBM a dřevního kalu). Změny vstupních surovin se na produkci bioplynu v této bioplynové stanici projevují přibližně po dvou dnech. Přidávky kalu či MBM v kratších časových intervalech by mohly vést ke zrovnoměnění chodu procesu, je ale možné je uskutečňovat pouze po vybudování meziskladu. Ten by mohl řešit i situace, kdy obsah sušiny

v čerpané směsi poklesne vlivem náhodného pozdního příjezdu dodavatele MBM či kalu.

Z provedených analýz vzorků vstupní směsi je zřetelný pokles obsahu sušiny o víkendech, který by bylo možno změnit záměnou některé dodávky kalu za MBM. Změny vstupních surovin se na produkci bioplynu projevují přibližně po dvou dnech. Dohoda o pravidelnějších dodávkách surovin s dodavateli by byla přínosná, vhodné by bylo rovněž posunout první pondělní várky kalu na dřívější hodinu. Na základě provedených analýz chemického a mikrobiálního složení digestátu nebylo možno tento materiál označit za zcela vyhovující pro aplikaci na zemědělské půdě (viz tabulka 22). Uvedená skutečnost však mohla být ovlivněna (z hlediska roční doby) pozdním termínem provedeného měření (prosinec 2004), spojeným s určitým poklesem reakční teploty oproti běžnému stavu.

Pro odhalení hlubších souvislostí mezi složením vstupní směsi, složením bioplynu, vlastnostmi digestátu a produkcí elektrické energie bylo rozhodnuto realizovat provozní měření trvající delší dobu, než je průměrná doba zdržení směsi v reaktoru (24 dní). Pro možnost přesnějšího vyhodnocení chodu procesu je rovněž potřebné mít k dispozici podrobnější rozpis množství směsi čerpané do bioreaktorů. Tento rozpis nebyl v průběhu měření v prosinci 2004 pořízen.

5.3 Vyhodnocení provozu bioreaktorů dle záznamů v provozní knize

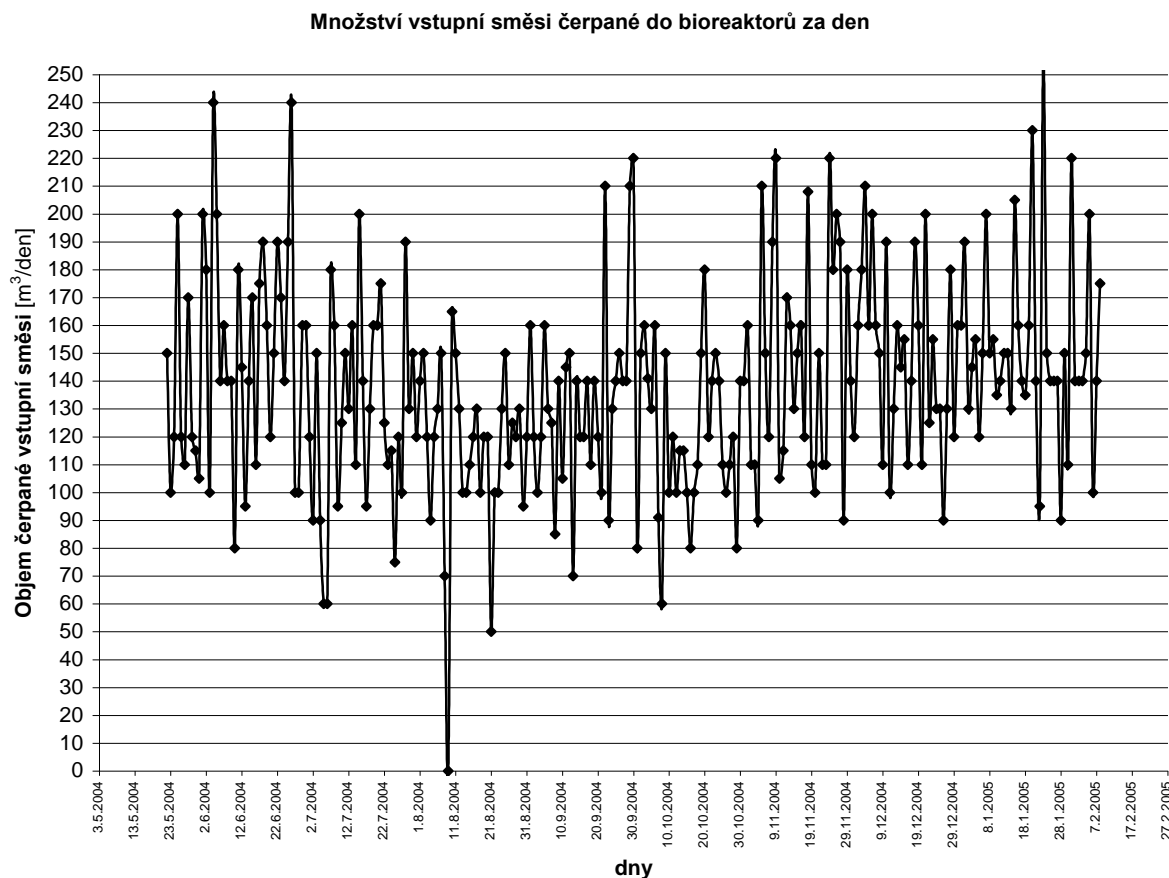
Firma GT 92, s.r.o. poskytla pro potřeby vyhodnocení procesu provozní knihu [113], do níž obsluha bioreaktorů ve Velkých Albrechticích pravidelně zapisuje množství čerpané vstupní směsi (směsi kejdý s kalem a MBM, případně jinými bioodpady) a časy čerpání. K dispozici byly záznamy z období osmi a půl měsíců (od 22.5.2004 do 8.2.2005). Vyhodnocení množství čerpané vstupní směsi do bioreaktorů v průběhu tohoto období je uvedeno v tabulce 24 a v grafu na obrázku č. 6. Toto vyhodnocení bylo provedeno pro ověření poměru množství čerpané vstupní směsi v první a druhé polovině dne (v první pracovní směně od 6⁰⁰ hodin do 18⁰⁰ hodin a ve druhé pracovní směně od 18⁰⁰ hodin do 6⁰⁰ hodin následujícího dne).

V první směně bylo čerpáno více než dvojnásobné množství vstupní směsi, než ve směně druhé. Množství vstupní směsi čerpané do prvního a druhého bioreaktoru se liší zanedbatelně. Je zřejmé, že ve druhé směně je dosud rezerva množství čerpané vstupní směsi. Tuto rezervu by bylo vhodné využít dodávkou některého materiálu s vysokým obsahem sušiny. V úvahu přichází další dodávka masokostní moučky. Zvýšení objemu čerpané vstupní směsi ve druhé směně na dvojnásobnou hodnotu pravděpodobně nezpůsobí přetížení bioreaktorů, ale vhodnější by bylo zároveň snížit objem směsi v první směně.

Tabulka č. 24: Čerpání vstupní směsi do bioreaktorů v letech 2004/2005

ČERPÁNÍ VSTUPNÍ SMĚSI	DENNÍ PRŮMĚR [m ³ /den]	CELKEM ZA OBDOBÍ [m ³]
Čerpáno vstupní směsi za den	138,0	
Čerpáno vstupní směsi během 1. směny (6 ⁰⁰ hodin až 18 ⁰⁰ hodin)	100,5	26419
Čerpáno vstupní směsi během 2. směny (18 ⁰⁰ hodin až 6 ⁰⁰ hodin)	37,5	9871
Čerpáno vstupní směsi do 1. bioreaktoru	68,5	18019
Čerpáno vstupní směsi do 2. bioreaktoru	69,5	18271

Poznámka: Data hodnocena dle provozní knihy obsluhy bioreaktorů za období od 22.5.2004 do 8.2.2005.



Obr. 6: Čerpání vstupní směsi v bioplynové stanici firmy GT92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích; záznamy z období osmi a půl měsíců (od 22.5.2004 do 8.2.2005).

Je zřejmé, že prostor pro zrovnoměnění množství vsázky do bioreaktorů v této zemědělské bioplynové stanici existuje.

5.4 Ověření možnosti optimalizace skladby vsázky

Za účelem posouzení možností optimalizace chodu anaerobního procesu v bioplynové stanici společnosti GT 92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích bylo rozhodnuto realizovat dlouhodobé provozní sledování (a to za příznivějších podmínek, zejména z hlediska venkovních teplot) v měsících září a říjen 2005. Vypracován byl projekt provozního měření, zahrnujícího zpřesněný monitoring všech významných parametrů nezbytných k sestavení materiálové a energetické bilance anaerobního procesu a celé bioplynové stanice.

5.4.1 Dlouhodobé provozní měření (rok 2005)

Dlouhodobé provozní měření bylo zahájeno v pondělí dne 26.9.2005 a ukončeno po více jak čtyřech týdnech (celkem 29 dní) dne 24.10.2005. Cílem tohoto dlouhodobého provozního měření a sledování bylo studium chodu bioplynové stanice při rozdílných skladbách vstupní směsi bioodpadů. Dalším cílem bylo ověření vlastností výstupního kapalného produktu fermentace (digestátu) s ohledem na jeho nezávadnost pro použití jako hnojiva. Měření bylo založeno na kontinuálním sběru a ukládání naměřených dat do paměti počítače, a to zejména pro data chemického složení bioplynu a jeho produkce a rovněž pro data o produkci činné hrubé a čisté elektrické energie vyrobené kogeneračními jednotkami. Pro účely identifikace průběhu a technologického postupu výroby bioplynu bylo provedeno:

- sledování hmotnostních toků kalu a MBM a objemových toků vstupní směsi;
- sledování hmotnostního zastoupení celkové sušiny ve vstupní směsi a v jednotlivých surovinách;
- sledování hmotnostního zastoupení organických látek, organického uhlíku a celkového dusíku ve vstupní směsi a v jednotlivých surovinách;
- sledování reakční teploty v bioreaktorech;
- sledování objemového toku vystupujícího digestátu;
- sledování obsahu CH₄, CO₂, O₂, CO, NO, SO₂ v bioplynu;
- sledování výroby elektrické energie;
- sledování dodávek elektrické energie do sítě;
- ověření chemických a mikrobiálních parametrů výstupního kapalného produktu.

Údaje o množství dováženého kalu a masokostní moučky a o množství směsi čerpané do bioreaktorů byly zaznamenávány již dva týdny před počátkem samotného měření.

5.4.2 Souhrn měřených (sledovaných) parametrů

V souhrnu bylo navrženo měření, respektive sledování následujících parametrů:

A. Množství dílčích surovin a celkový objem anaerobní vsázky, vstupující do bioreaktorů:

a) Hmotnosti dílčích surovin (MBM a kalu)

- zjišťováno ze zápisů o hmotnostech dodaných surovin vedených v evidenční knize na vrátnici závodu;
- čas zápisu dovozu suroviny (dle záznamů na vrátnici podniku) odpovídá přibližně času vyklopení suroviny do míchací jímky;
- údaje shrnuty v tabulkách 26, 28 a graficky v příloze 2 A.

b) Objem vstupní směsi čerpané do reaktoru

- měřen průtokoměrem v přívodním potrubí každého bioreaktoru;
- převzat ze zápisů vedených v evidenční knize obsluhy bioreaktorů;
- časový údaj odpovídá počátku čerpání zahuštěné směsi v 1. či 2. směně;
- zaznamenán je objem směsi, čerpané do každého z bioreaktorů během dne;
- údaje shrnuty v tabulkách 26, 28 a graficky v příloze 2 B.

B. Množství vzniklého bioplynu a vyrobené činné elektrické energie

a) Objem vyrobeného bioplynu

- měření objemového množství bioplynu dodaného dmychadly bylo realizováno ve spodní větvi plynovodu ke kogeneračním jednotkám 1, 5, 6 a to pomocí turbínového plynoměru typu RPT3 fa Gas a.s., vybaveného nízkofrekvenčním snímačem s přesností měření ± 2 %. Informace o spotřebovaném množství bioplynu kogeneračními jednotkami byly ukládány do digitální ústředny AMIT;
- pro stanovení absolutního tlaku bioplynu v potrubí byl měřen barometrický tlak přístrojem Airflow DB-1 (přesnost měření ± 5 %);
- odečtená hodnota objemu bioplynu byla přepočtena na normální podmínky (101,325 kPa, 0 °C);
- údaje shrnuty v tabulce 33 a graficky v příloze 2 H.

b) Výhřevnost bioplynu

- stanovena výpočtem z naměřeného obsahu metanu v bioplynu;
- údaje shrnuty v tabulce 32.

c) Vyrobená hrubá činná elektrická energie

- odečítána automaticky pomocí měřiče impulsů na začátku každé hodiny z jednotlivých elektroměrů všech jednotek;
- údaje shrnuty v tabulce 33 a graficky v příloze 2 H.

d) Činná elektrická energie dodaná do sítě

- odečítána ručně jednou denně vždy v 8⁰⁰ hodin;
- údaje shrnuty v tabulce 33 a graficky v příloze 2 K.

C. Složení bioplynu:

a) Obsah CH₄

- měřen infračerveným analyzátozem Infralyt DUO CH₄ s chybou přibližně 2 % v minutových intervalech od 26.9.2005, 00⁰⁰ hodin do 24.10.2005, 24⁰⁰ hodin (údaje shrnuty v tabulce 32 a graficky v příloze 2 I).

b) Obsah CO₂

- měřen analyzátozem Infralyt 4000 v minutových intervalech od 26.9.2005, 000 hodin do 24.10.2005, 2400 hodin (údaje shrnuty v tabulce 32).

c) Obsah O₂

- měřen analyzátozem Infralyt 4000 v minutových intervalech od 26.9.2005, 00⁰⁰ hodin do 24.10.2005, 24⁰⁰ hodin (údaje shrnuty v tabulce 32).

d) Obsahy NO, SO₂

- měřeny analyzátozem Infralyt 50 v minutových intervalech od 26.9.2005, 00⁰⁰ hodin do 24.10.2005, 24⁰⁰ hodin (údaje shrnuty v tabulce 32).

D. Teploty v bioreaktorech R1 a R2

- hodnoty převzaty z ručních zápisů obsluhy bioreaktorů, v nichž byl uveden aritmetický průměr teplot naměřených termočládky na čtyřech místech každého z bioreaktorů;
- teploty zaznamenávány v půlhodinových intervalech, hodnoty nejsou v této zprávě uvedeny, pro grafické zpracování byly použity průměrné denní hodnoty;
- údaje shrnuty graficky v příloze 2 F.

Teplota bioplynu byla měřena kontinuálně, hodnoty byly použity pro přepočet množství bioplynu na normální podmínky.

E. Stav naplnění plynojemu

- hodnoty převzaty ze zápisů obsluhy bioreaktorů;
- zaznamenáván počet svítících kontrolky naplnění plynojemu v půlhodinových intervalech; maximální počet kontrolky je 10;
- údaje shrnuty graficky v příloze 2 G.

F. Odběr vzorků na analýzu**a) Vzorky vstupní směsi**

- pro účely stanovení obsahu sušiny a chemických parametrů vstupní směsi byly vzorky odebírány z homogenizační jímky před začátkem čerpání do bioreaktorů, celkem bylo odebráno 43 vzorků;
- odběr proveden pětilitrovou nádobou, směs uchována v cca 100 ml plastové nádobce;
- hodnoty obsahu sušiny ve vstupní směsi shrnuty v tabulce 31 a graficky v příloze 2 C.

b) Vzorky kapalného produktu po anaerobní digestci (digestátu)

- odebírány namátkově pro laboratorní rozbor obsahu těžkých kovů, patogenních látek a mikroorganismů;

- odběr proveden z konce potrubí před skladovacími jímkami digestátu plastovou nádobou, odebrané množství cca 1,5 l;
- protokoly s výsledky rozborů digestátů jsou uvedeny v příloze 2 L.

Měřicí přístroje

Pro provozní měření byly použity analyzátory typu NDIR. Pro stanovení obsahu CO₂ byl použit infračervený analyzátor se širším měřicím rozsahem (do 50 % obj.) a pro stanovení obsahu O₂ byl použit infračervený analyzátor s měřicím rozsahem do 21 % obj. Byla použita společná odběrová trasa bioplynu pro všechny tři analyzátory.

5.4.3 Vyhodnocení výsledků měření (rok 2005)

Z hlediska druhu a množství zpracovávaných surovin bylo provozní sledování a měření rozděleno do pěti časových období 0, A, B, C, D (viz tabulka 25), z nichž jsou nejvýznamnější období A,B,C. V období 0 byly sledovány toky vstupních surovin, ale nebylo ještě realizováno měření produkce bioplynu a elektrické energie. V období D se chod bioreaktorů zpětně ustaloval na běžný provoz. Vyhodnocení získaných dat bylo provedeno jednak za celou dobu sledování a jednak za každé období samostatně. Výsledky byly zpracovány jak v tabulkové, tak i v grafické formě a jsou uvedeny v tabulkách 25 až 34 a v grafech v příloze 2. Kromě sledování běžného provozu bioreaktorů byly v průběhu měření realizovány a sledovány dvě zásadní změny v dodávkách vstupních surovin:

- ♦ vyloučení kalu (bioreaktory zpracovávaly pouze prasečí kejdu ve směsi s masokostní moučkou – období B);
- ♦ doplnění další dávky masokostní moučky v odpoledních hodinách (období C).

Tabulka č. 25: **Monitorovaná období během provozního experimentu**

Období 0	Od 12.9.05 do 26.9.05	Běžný provoz (spotřeba dřevního kalu a masokostní moučky)
Období A	Od 26.9.05 do 5.10.05	Běžný provoz (spotřeba dřevního kalu a masokostní moučky)
Období B	Od 6.10.05 do 18.10.05	Provoz s vyloučením dřevního kalu (spotřebovávána pouze kejda s MBM)
Období C	Od 19.10.05 do 21.10.05	Provoz s odpolední dávkou MBM navíc
Období D	Od 22.10.05 do 24.10.05	Běžný provoz (spotřeba dřevního kalu a masokostní moučky)

Poznámka: Nejvýznamnější jsou sledovaná období A,B,C.

5.4.4 Spotřeba kalu a masokostní moučky

Spotřeby kalu a masokostní moučky v jednotlivých dnech sledování (od 12.9.2005 do 24.10.2005) jsou uvedeny v tabulce 26 a v příloze 2. Celková množství těchto materiálů spotřebovaná v jednotlivých sledovaných obdobích (dle tabulky 25) jsou uvedena v tabulce 28. V období B nebyl spotřebováván kal, průměrná denní spotřeba masokostní moučky byla přibližně o 35 % hm. vyšší než při běžném provozu v období A. V období C (přidání další dávky MBM) byla průměrná denní spotřeba masokostní moučky o 44 % vyšší než při běžném provozu v období A. Pro vyhodnocení vlivů změn složení vstupní směsi na produkci bioplynu jsou dále porovnávána především období A, B, C.

Tabulka č. 26: Spotřeba dřevního kalu a masokostní moučky během provozního měření

Období	Den měření		Datum	Spotřeba dřevního kalu	Spotřeba MBM
				[kg]	[kg]
0	1	Pondělí	12.9.2005	19120	8250
	2	Úterý	13.9.2005	-	16290
	3	Středa	14.9.2005	21500	8440
	4	Čtvrtek	15.9.2005	-	16660
	5	Pátek	16.9.2005	22520	8040
	6	Sobota	17.9.2005	43240	-
	7	Neděle	18.9.2005	47920	-
	8	Pondělí	19.9.2005	22320	7790
	9	Úterý	20.9.2005	-	15390
	10	Středa	21.9.2005	25160	7490
	11	Čtvrtek	22.9.2005	-	7850
	12	Pátek	23.9.2005	31920	7840
	13	Sobota	24.9.2005	50020	-
	14	Neděle	25.9.2005	48600	-
Denní průměr za období 0				33232	10404
A	1	Pondělí	26.9.2005	23380	7910
	2	Úterý	27.9.2005	-	16320
	3	Středa	28.9.2005	23080	-
	4	Čtvrtek	29.9.2005	-	15490
	5	Pátek	30.9.2005	19640	8120
	6	Sobota	1.10.2005	21800	-
	7	Neděle	2.10.2005	20620	-
	8	Pondělí	3.10.2005	20780	8320
	9	Úterý	4.10.2005	-	15880
	10	Středa	5.10.2005	23960	8070
Denní průměr za období A				21894,3	11444
B	11	Čtvrtek	6.10.2005	-	15480
	12	Pátek	7.10.2005	-	16750
	13	Sobota	8.10.2005	-	16940
	14	Neděle	9.10.2005	-	8880
	15	Pondělí	10.10.2005	-	15880
	16	Úterý	11.10.2005	-	15320
	17	Středa	12.10.2005	-	15860
	18	Čtvrtek	13.10.2005	-	16090
	19	Pátek	14.10.2005	-	16020
	20	Sobota	15.10.2005	-	16230
	21	Neděle	16.10.2005	-	-
	22	Pondělí	17.10.2005	-	16250
	23	Úterý	18.10.2005	-	16100
Denní průměr za období B				0	15483
C	24	Středa	19.10.2005	25400	16390
	25	Čtvrtek	20.10.2005	-	25060
	26	Pátek	21.10.2005	23200	8120
Denní průměr za období C				24300	16523
D	27	Sobota	22.10.2005	50080	-
	28	Neděle	23.10.2005	46100	-
	29	Pondělí	24.10.2005	23900	7980
Denní průměr za období D					
Denní průměr za celé sledované období [kg]				29739	12955
Celkově spotřebováno materiálu [kg]				654260	427500

Poznámka: Kvalita dřevního kalu a masokostní moučky se během sledované doby neměnila (viz tabulka 29).

5.4.5 Spotřeba vstupní směsi

Spotřebovaná množství vstupní směsi v jednotlivých dnech sledování (od 12.9.2005 do 24.10.2005) jsou uvedena v tabulce 27, celková spotřeba vstupní směsi v jednotlivých obdobích je uvedena v tabulce 28. V období A (běžný provoz) bylo spotřebováno přibližně 1,3-krát více vstupní směsi než v období B, kdy tato směs obsahovala pouze masokostní moučku. Tato skutečnost souvisí se záměrem udržení konstantní výroby elektrické energie (v období B docházelo k nárůstu produkce bioplynu na jednotku vstupní směsi).

Tabulka č. 27: **Spotřeba vstupní směsi během provozního měření**

Období	Den měření		Datum	Spotřeba vstupní směsi [m ³]				
				Denně	00:00 až 11:59	12:00 až 23:59	bioreaktor R1	bioreaktor R2
0	1	Pondělí	12.9.2005	130	100	30	65	65
	2	Úterý	13.9.2005	140	80	60	70	70
	3	Středa	14.9.2005	140	80	60	80	60
	4	Čtvrtek	15.9.2005	160	100	60	80	80
	5	Pátek	16.9.2005	140	80	60	60	80
	6	Sobota	17.9.2005	170	40	130	70	100
	7	Neděle	18.9.2005	170	90	80	100	70
	8	Pondělí	19.9.2005	240	110	130	120	120
	9	Úterý	20.9.2005	140	80	60	70	70
	10	Středa	21.9.2005	180	100	80	90	90
	11	Čtvrtek	22.9.2005	140	80	60	80	60
	12	Pátek	23.9.2005	180	120	60	90	90
	13	Sobota	24.9.2005	170	140	30	60	110
	14	Neděle	25.9.2005	290	180	110	120	170
Denní průměr za období 0				170,7	98,6	72,1	82,5	88,2
A	1	Pondělí	26.9.2005	200	70	130	100	100
	2	Úterý	27.9.2005	190	100	90	110	80
	3	Středa	28.9.2005	180	80	100	90	90
	4	Čtvrtek	29.9.2005	220	100	120	110	110
	5	Pátek	30.9.2005	160	100	60	90	70
	6	Sobota	1.10.2005	160	100	60	80	80
	7	Neděle	2.10.2005	275	100	175	115	160
	8	Pondělí	3.10.2005	215	35	180	120	95
	9	Úterý	4.10.2005	130	65	65	65	65
	10	Středa	5.10.2005	160	100	60	80	80
Denní průměr za období A				189,0	85,0	104,0	96,0	93,0
B	11	Čtvrtek	6.10.2005	140	100	40	70	70
	12	Pátek	7.10.2005	140	80	60	70	70
	13	Sobota	8.10.2005	150	80	70	80	70
	14	Neděle	9.10.2005	150	40	110	80	70
	15	Pondělí	10.10.2005	140	100	40	60	80
	16	Úterý	11.10.2005	150	110	40	55	95
	17	Středa	12.10.2005	180	100	80	100	80
	18	Čtvrtek	13.10.2005	140	20	120	80	60
	19	Pátek	14.10.2005	100	30	70	50	50
	20	Sobota	15.10.2005	140	60	80	70	70
	21	Neděle	16.10.2005	100	40	60	50	50
	22	Pondělí	17.10.2005	140	80	60	70	70
	23	Úterý	18.10.2005	160	80	80	80	80
Denní průměr za období B				140,8	70,8	70,0	70,4	70,4
C	24	Středa	19.10.2005	80	40	40	40	40
	25	Čtvrtek	20.10.2005	200	140	60	100	100
	26	Pátek	21.10.2005	220	100	120	110	110
Denní průměr za období C				167	93	73	83	83
D	27	Sobota	22.10.2005	80	80	0	40	40
	28	Neděle	23.10.2005	280	200	80	140	140
	29	Pondělí	24.10.2005	140	80	60	70	70
Denní průměr za období D				167	120	47	83	83
Denní průměr [m ³]				165	88	77	82	83
Celkově spotřebováno [m ³]				7110	3790	3320	3530	3580

Poznámka: Vstupní směs se běžně skládá z prasečí kejdy, dřevního kalu a masokostní moučky. Konkrétní složení závisí na týdenním řádu dovozu surovin (viz tabulka 16) a období sledování 0, A, B, C, D (viz tabulka 24).

Tabulka č. 28: **Spotřeba dřevního kalu, MBM a vstupní směsi v obdobích 0, A, B, C, D.**

Období	Spotřeba dřevního kalu [kg]		Spotřeba MBM [kg]		Spotřeba vstupní směsi [m ³]	
	Denní průměr	Celkem za období	Denní průměr	Celkem za období	Denní průměr	Celkem za období
0	33232	332320	10404	104 040	171	2390
A	21894	153260	11444	80110	189	1890
B	0	0	15483	185800	141	1830
C	24300	48600	16523	49570	167	500
D	40027	120080	2660	7980	167	500

5.4.6 Analýzy vstupních surovin

Analýze bylo podrobeno 7 vzorků masokostní moučky, 6 vzorků prasečí kejdy a 5 vzorků kalu. Parametry $Y_{CH_4/s}$ (teoretická měrná produkce metanu), % CH_4 (teoretický obsah metanu v bioplynu) a C:N (poměr dusíku a uhlíku) byly vypočteny ze základních naměřených parametrů. Výsledky analýz a výpočtů s uvedením časů odběru vzorků jsou shrnuty v tabulce 29.

Tabulka č. 29: Výsledky analýz a výpočtů u vzorků MBM, dřevního kalu a prasečí kejdy

Vzorek	Odběr vzorku			Celková sušina	N _{celk.}	Organické látky	TOC _{měr.}	%CH ₄	Y _{CH₄/s}	C:N
	Den	Datum	Čas	[% hm.]	[g/gsušiny]	[g/gsušiny]	[g/gsušiny]	[% obj.]	[g/gsušiny]	[-]
MBM	Pondělí	12.9.2005	12:00	97,4	0,080	0,747	0,381	36,8	0,187	4,8
	Úterý	4.10.2005	13:30	96,4	0,078	0,776	0,504	28,9	0,194	6,5
	Pátek	14.10.2005	12:00	98,2	0,074	0,727	0,473	28,8	0,182	6,4
	Pondělí	17.10.2005	14:00	87,9	0,078	0,749	0,487	28,8	0,187	6,3
	Středa	19.10.2005	12:30	98,1	0,079	0,757	0,492	28,8	0,189	6,3
	Středa	19.10.2005	13:00	92,8	0,072	0,740	0,481	28,8	0,185	6,7
	Středa	19.10.2005	18:00	95,9	0,074	0,736	0,858	16,1	0,184	11,6
	Průměrná hodnota			95,2	0,076	0,747	0,525	28,2	0,187	6,9
Prasečí kejda	Pondělí	3.10.2005	13:00	3,4	0,036	0,585	0,299	36,70	0,146	8,2
	Úterý	4.10.2005	8:00	1,8	0,049	0,637	0,417	28,6	0,159	8,6
	Čtvrtek	6.10.2005	13:00	3,6	0,028	0,596	0,387	28,9	0,149	13,7
	Pondělí	10.10.2005	13:30	3,0	0,030	0,672	0,437	28,8	0,168	14,6
	Úterý	11.10.2005	14:00	3,6	0,038	0,696	0,452	28,9	0,174	12,0
	Čtvrtek	13.10.2005	14:00	1,5	0,036	0,665	0,432	28,9	0,166	11,9
	Průměrná hodnota			2,8	0,036	0,642	0,404	30,1	0,160	11,5
Dřevní kal	Středa	5.10.2005	8:30	26,7	0,043	0,563	0,366	28,8	0,141	8,6
	Sobota	22.10.2005	7:30	28,9	0,037	0,588	0,382	28,9	0,147	10,3
	Sobota	22.10.2005	11:00	27,6	0,037	0,610	0,397	28,8	0,153	10,7
	Neděle	23.10.2005	7:30	18,0	0,039	0,610	0,397	28,8	0,153	10,3
	Neděle	23.10.2005	14:00	19,3	0,051	0,651	0,423	28,9	0,163	8,3
	Průměrná hodnota			24,1	0,041	0,604	0,393	28,8	0,151	9,6

Poznámka: MBM je masokostní moučka III. kategorie, $Y_{CH_4/s}$ je teoretická produkce metanu, %CH₄ je teoretický obsah metanu v bioplynu, C:N je vypočten jako poměr celkového organického uhlíku (TOC) a celkového dusíku vzorku. Obsah organických látek byl stanoven jako ztráta žiháním při 550 °C.

Průměrný obsah celkové sušiny prasečí kejdy byl v průběhu měření 2,8 % hm. Obsah celkové sušiny kalu se běžně pohybuje kolem 27 % hm. Obsah sušiny masokostní moučky je stabilně vyšší než 95 % hm., náhodně může klesnout vlivem povětrnostních podmínek (pokud dojde k navlhnutí moučky).

Průměrný obsah organických látek stanovený jako ztráta žiháním je nejvyšší u masokostní moučky (0,747 g/g sušiny), nižší u surové kejdy (0,642 g/g sušiny) a nejnižší u kalu (0,604 g/g sušiny). To koresponduje se vzrůstem obsahu organických látek v období B (při provozu pouze na kejdu s moučkou) a v menší míře i v období C (při dodávce moučky navíc).

Průměrný obsah celkového organického uhlíku je nejvyšší u masokostní moučky (0,525 g/g sušiny), zatímco surová prasečí kejda a kal mají obsah organického uhlíku nižší a sobě velice podobný (0,404 u kejdy a 0,393 u kalu g/g sušiny).

Průměrný obsah celkového dusíku je nejvyšší u masokostní moučky (0,076 g/g sušiny), nižší u kalu (0,041 g/g sušiny) a u surové kejdy jen 0,036 g/g sušiny.

Průměrný poměr C:N byl z naměřených hodnot obsahu uhlíku a dusíku vypočten nejvyšší u kejdy (11:1), nižší u kalu (9:1) a nejnižší u masokostní moučky (7:1). Všechny tři materiály hodnotou tohoto parametru vyhovují teoretickým předpokladům pro stabilní průběh procesu anaerobní digesce.

5.4.7 Analýzy vstupní směsi

Chemické analýze bylo podrobena celkem 43 vzorků vstupní směsi. Vzorky vstupní směsi byly odebírány jednak v průběhu čtrnácti dní před počátkem provozního měření, jednak v průběhu tohoto měření.

5.4.7.1 Obsah celkové sušiny

Byl stanoven obsah celkové sušiny v pravidelně odebíraných vzorcích vstupní směsi. Zjištěná hodnota celkového obsahu sušiny se pohybovala v rozmezí od 5,32 % hm. do 22,2 % hm., průměrný obsah celkové sušiny ve vzorcích vstupní směsi za celé sledované období byl 10,39 % hm. sušiny, v období A 8,43 % hm., v období B 12,46 % hm., v období C 13,33 % hm.). Průměrné hodnoty obsahy celkové sušiny ve vzorcích vstupní směsi jsou uvedeny v tabulce 30, hodnoty obsahu sušiny jednotlivých vzorků směsi (i s uvedením složek vzorku směsi) jsou shrnuty v tabulce 31 a v příloze 2.

5.4.7.2 Měrný obsah organických látek

Měrný obsah organických látek nebyl z důvodu vysokých obsahů sušiny stanoven jako měrná chemická spotřeba kyslíku (CHSK_{Cr}), ale byl stanoven jako ztráta žiháním při 550 °C (ZŽ). Průměrný obsah organických látek v odebraných vzorcích byl 0,7 g/g celkové sušiny. Výsledky analýz ZŽ ve vzorcích vstupní směsi (i s uvedením složek směsi) jsou shrnuty v tabulce 31 a v příloze 2.

Tabulka č. 30: Průměrné hodnoty parametrů vstupní směsi ve sledovaných obdobích

Období	Celková sušina	N _{celk.}	Organické látky	TOC _{měr.}	%CH ₄	Y _{CH₄/s}	C:N
	[% hm.]	[g/gsušiny]	[g/gsušiny]	[g/gsušiny]	[% obj.]	[g/gsušiny]	[-]
<i>0</i>	9,72	0,0485	0,7084	0,3506	40,4	0,177	7,69
<i>A</i>	8,43	0,0467	0,6710	0,3760	33,9	0,168	8,16
<i>B</i>	12,46	0,0643	0,7480	0,4863	28,8	0,187	7,66
<i>C</i>	13,33	0,0478	0,6800	0,5307	25,2	0,170	11,40
<i>D</i>	9,65	0,0400	0,6465	0,6510	18,7	0,162	16,63

Poznámka: Období 0, A, B, C, D jsou definována v tabulce 25. Y_{CH₄/s} je teoretická produkce metanu, %CH₄ je teoretický obsah metanu v bioplynu, C:N je vypočten jako poměr celkového organického uhlíku (TOC) a celkového dusíku vzorku. Obsah organických látek byl stanoven jako ztráta žiháním při 550 °C.

5.4.7.3 Měrný obsah organického uhlíku

Měrný obsah organického uhlíku byl stanoven jako celkový měrný organický uhlík (TOC_{měr.}). Hodnota tohoto parametru vlivem masokostní moučky v období B významně vzrostla (přibližně z hodnoty 0,4 na 0,5 g/gsušiny). Výsledky provedených analýz TOC_{měr.} ve vzorcích vstupní směsi (i s uvedením složek směsi) jsou shrnuty v tabulce 31 a v příloze 2.

5.4.7.4 Měrný obsah celkového dusíku

Z technických důvodů nebyl stanoven měrný obsah organického dusíku ($N_{org.}$), ale byl stanoven měrný obsah celkového dusíku ($N_{celk.}$). Tento obsah dusíku výrazně vzrostl vždy, když vstupní směs obsahovala masokostní moučku (nejvýrazněji vzrostl v období B vlivem masokostní moučky při současné absenci kalu), Výsledky analýz jsou shrnuty v tabulce 31.

Tabulka č. 31: Výsledky analýz a výpočtů u vzorků vstupní směsi

Období	Vzorek vstupní směsi	Odběr vzorku			Celk. sušina	$N_{celk.}$	Org. látky	TOC _{měr.}	%CH ₄	$Y_{CH_4/s}$	C:N
		Den	Datum	Čas	[% hm.]	[g/gsušiny]	[g/gsušiny]	[g/gsušiny]	[% obj.]	[g/gsušiny]	[-]
0	Kejda + kal	Po	12.9.2005	9:30	6,3	0,034	0,726	0,402	33,9	0,182	11,8
	Kejda + kal + MBM	Po	12.9.2005	13:00	10,1	0,042	0,751	0,382	36,9	0,188	9,0
	Kejda + kal + MBM	Po	12.9.2005	14:30	10,5	0,051	0,686	0,334	38,5	0,172	6,6
	Kejda + MBM	Út	13.9.2005	11:00	10,9	0,059	0,711	0,511	26,1	0,178	8,6
	Kejda + MBM	Út	13.9.2005	20:30	14,2	0,063	0,722	0,195	69,4	0,181	3,1
	Kejda + kal + MBM	St	14.9.2005	9:00	8,4	0,042	0,693	0,268	48,5	0,173	6,4
	Kejda + kal + MBM	St	14.9.2005	13:00	7,7	0,062	0,688	0,345	37,4	0,172	5,6
	Kejda + MBM	Čt	15.9.2005	9:30	8,8	0,065	0,710	0,436	30,5	0,178	6,7
	Kejda + kal + MBM	Pá	16.9.2005	8:00	10,1	0,069	0,731	0,346	39,6	0,183	5,0
	Kejda + kal + MBM	Pá	16.9.2005	10:00	10,2	0,061	0,724	0,326	41,6	0,181	5,4
	Kejda + MBM	Pá	16.9.2005	13:00	12,4	0,060	0,714	0,190	70,1	0,179	3,2
	Kejda + kal	So	17.9.2005	12:00	12,9	0,047	0,712	0,391	34,1	0,178	8,3
	Kejda + kal	So	17.9.2005	13:30	9,6	0,034	0,688	0,276	46,7	0,172	8,2
	Kejda + kal	Ne	18.9.2005	8:00	9,3	0,034	0,713	0,311	43,0	0,178	9,3
	Kejda + kal	Ne	18.9.2005	12:30	6,7	0,034	0,708	0,373	35,6	0,177	10,8
	Kejda + kal	Po	19.9.2005	8:30	5,3	0,035	0,705	0,337	39,2	0,176	9,8
	Kejda + kal + MBM	Po	19.9.2005	12:30	8,7	0,034	0,698	0,293	44,7	0,175	8,6
	Kejda + kal + MBM	Út	20.9.2005	8:30	10,0	0,047	0,699	0,490	26,7	0,175	10,5
	Kejda + MBM	Út	20.9.2005	13:30	11,5	0,053	0,718	0,314	42,9	0,180	5,9
	Kejda + kal + MBM	St	21.9.2005	8:30	10,2	0,051	0,712	0,290	46,0	0,178	5,7
	Kejda + kal + MBM	St	21.9.2005	12:30	11,4	0,056	0,707	0,462	28,7	0,177	9,5
	Kejda + kal	Ne	25.9.2005	12:00	8,7	0,035	0,668	0,440	28,5	0,167	12,6
Průměr za období 0					9,7	0,049	0,708	0,343	41,0	0,177	7,6
A	Kejda + kal	Po	26.9.2005	8:30	7,8	0,036	0,685	0,340	37,8	0,171	9,5
	Kejda + kal + MBM	Po	26.9.2005	13:30	7,1	0,040	0,670	0,340	37,0	0,168	8,4
	Kejda + kal + MBM	Po	3.10.2005	13:30	8,1	0,051	0,642	0,338	35,6	0,161	6,6
	Kejda + kal + MBM	Út	4.10.2005	8:30	9,8	0,050	0,679	0,440	28,9	0,170	8,8
	Kejda + MBM	Út	4.10.2005	13:30	9,4	0,056	0,680	0,422	30,2	0,170	7,5
Průměr za období A					8,4	0,047	0,671	0,376	33,9	0,168	8,2
B	Kejda + MBM	Po	10.10.2005	8:30	8,4	0,051	0,724	0,471	28,82	0,181	9,3
	Kejda + MBM	Po	10.10.2005	13:00	10,2	0,058	0,742	0,482	28,26	0,186	8,3
	Kejda + MBM	Út	11.10.2005	8:00	17,9	0,066	0,748	0,486	28,86	0,187	7,4
	Kejda + MBM	Út	11.10.2005	12:00	12,4	0,064	0,770	0,501	28,82	0,193	7,9
	Kejda + MBM	Čt	13.10.2005	14:00	11,1	0,064	0,762	0,495	28,86	0,191	7,7
	Kejda + MBM	Po	17.10.2005	9:00	8,2	0,062	0,709	0,461	28,84	0,177	7,4
	Kejda + MBM	Po	17.10.2005	13:30	9,1	0,064	0,740	0,481	28,85	0,185	7,6
	Kejda + MBM	Út	18.10.2005	8:00	12,6	0,068	0,754	0,490	28,85	0,189	7,2
	Kejda + MBM	Út	18.10.2005	13:00	22,2	0,082	0,784	0,510	28,82	0,196	6,2
Průměr za období B					12,5	0,064	0,748	0,486	28,84	0,187	7,7
C	Kejda + kal + MBM	St	19.10.2005	8:00	11,8	0,053	0,698	0,454	28,83	0,175	8,6
	Kejda + kal + MBM	St	19.10.2005	13:30	13,1	0,043	0,673	0,703	17,95	0,168	16,5
	Kejda + kal + MBM	Pá	21.10.2005	14:30	15,1	0,048	0,669	0,435	28,84	0,167	9,1
Průměr za období C					13,3	0,048	0,680	0,531	25,20	0,170	11,4
D	Kejda + kal + MBM	So	22.10.2005	9:00	11,4	0,038	0,625	0,406	28,86	0,156	10,6
	Kejda + kal	Ne	23.10.2005	8:30	8,8	0,034	0,638	0,415	28,83	0,160	12,3
	Kejda + kal	Po	24.10.2005	9:30	8,6	0,037	0,640	0,416	28,85	0,160	11,4
	Kejda + kal	Po	24.10.2005	14:00	9,8	0,051	0,683	0,444	28,84	0,171	8,7
Průměr za období D					9,7	0,040	0,646	0,420	28,84	0,162	10,7
Průměrná hodnota ze všech vzorků					10,4	0,051	0,705	0,401	28,84	0,176	8,3

Poznámka: Průměrné hodnoty ze všech sledovaných období jsou uvedeny rovněž v tabulce 30. %CH₄, $Y_{CH_4/s}$ a C:N jsou vypočtené hodnoty.

5.4.7.5 Poměr C:N

Poměr C:N byl vypočten jako podíl analýzou zjištěných hodnot $\text{TOC}_{\text{měr.}}$ a $\text{N}_{\text{celk.}}$. Naměřené hodnoty jsou u všech analyzovaných vzorků poměrně nízké, leží pod spodní doporučovanou hranicí 10:1. Hodnota tohoto parametru zvolna vzrůstala v průběhu měření. Maximální hodnota 16,5:1 byla naměřena u vzorku směsi kejdy s masokostní moučkou a kalem dne 19.10.2005 (v období C). Výsledky výpočtů parametru C:N u vzorků vstupní směsi jsou uvedeny v tabulce 31.

5.4.8 Kvantita a kvalita bioplynu

Za dobu 29-ti dnů provozního měření (od 26.9.2005 do 24.10.2005) bylo vyrobeno celkem 214303 m³ (vztaženo na provozní podmínky) bioplynu. Průměrná denní produkce bioplynu činila 7390 m³, respektive 7076 m_N³ (vztaženo na normální podmínky). Porovnání složení bioplynu v obdobích A, B, C je uvedeno v tabulce 32. V tabulce 33 jsou porovnávána množství vyrobeného bioplynu s množstvím vyrobené hrubé činné elektrické energie ve vybraných obdobích A, B, C, D.

Tabulka č. 32: Průměrné denní chemické složení a průměrná výhřevnost bioplynu

Období	Měřeno		CH ₄	CO ₂	O ₂	SO ₂	NO	Δ	Průměrná výhřevnost
	Den	Datum	[% obj.]	[% obj.]	[% obj.]	[% obj.]	[% obj.]	[% obj.]	[kJ.m _N ⁻³]
A	Pondělí	26.9.05	66,60	28,60	0,65	0,49	0,03	3,63	23848,1
	Úterý	27.9.05	65,01	29,75	0,65	0,49	0,04	4,06	23279,3
	Středa	28.9.05	64,41	33,50	0,59	0,50	0,05	0,95	23062,0
	Čtvrtek	29.9.05	66,32	28,95	0,56	0,49	0,06	3,62	23748,9
	Pátek	30.9.05	66,10	29,83	0,55	0,49	0,05	2,98	23667,7
	Sobota	1.10.05	68,53	29,96	0,58	0,48	0,05	0,40	24537,5
	Neděle	2.10.05	69,03	30,42	0,57	0,49	0,05	-0,56	24717,9
	Pondělí	3.10.05	70,74	33,09	0,56	0,50	0,05	-4,94	25330,2
	Úterý	4.10.05	68,65	31,66	0,55	0,40	0,06	-1,32	24581,0
	Středa	5.10.05	67,52	31,99	0,60	0,30	0,07	-0,48	24175,3
Průměr za období A			67,29	30,78	0,59	0,46	0,05	0,83	24094,8
B	Čtvrtek	6.10.05	67,88	30,43	0,68	0,30	0,07	0,64	24307,4
	Pátek	7.10.05	68,28	29,96	0,73	0,30	0,07	0,66	24450,5
	Sobota	8.10.05	67,58	30,29	0,79	0,30	0,07	0,97	24199,5
	Neděle	9.10.05	67,47	30,00	0,80	0,29	0,07	1,37	24157,4
	Pondělí	10.10.05	68,27	29,15	0,80	0,29	0,09	1,40	24446,6
	Úterý	11.10.05	68,35	30,28	0,78	0,0004	0,00	0,59	24459,5
	Středa	12.10.05	68,35	31,95	0,68	0,00	0,00	-0,98	24472,4
	Čtvrtek	13.10.05	67,74	30,22	0,61	0,00	0,00	1,43	24256,7
	Pátek	14.10.05	67,89	29,85	0,60	0,00	0,00	1,66	24309,8
	Sobota	15.10.05	68,10	30,38	0,60	0,0002	0,00	0,92	24385,9
	Neděle	16.10.05	68,63	29,93	0,65	0,0002	0,00	0,79	24573,3
	Pondělí	17.10.05	70,37	28,17	0,67	0,0012	0,00	0,78	25198,7
	Úterý	18.10.05	70,18	29,09	0,63	0,0013	0,00	0,10	25130,8
	Průměr za období B		68,39	29,98	0,69	0,11	0,03	0,79	24488,3
C	Středa	19.10.05	68,53	28,41	0,65	0,0003	0,00	2,41	24538,1
	Čtvrtek	20.10.05	67,17	29,40	0,64	0,00	0,04	2,75	24051,5
	Pátek	21.10.05	65,81	31,39	0,63	0,00	0,10	2,07	23565,0
Průměr za období C			67,17	29,73	0,64	0,00	0,05	2,41	24051,5
D	Sobota	22.10.05	64,94	30,38	0,59	0,00	0,00	4,09	24538,1
	Neděle	23.10.05	66,32	29,70	0,63	0,00	0,00	3,35	24051,5
	Pondělí	24.10.05	68,49	29,15	0,63	0,00	0,00	1,73	23565,0
Průměr za období D			66,58	29,74	0,62	0,00	0,00	3,06	24051,5
Celkový průměr			67,70	30,20	0,64	0,21	0,04	1,21	24262,3

Poznámka: Δ doplňuje součet složek bioplynu do 100 % obj. Pravděpodobně se jedná o dusík. Výhřevnost platí pro normální podmínky.

Nejvyšší průměrná denní produkce bioplynu (7760 m^3) byla v období B (provoz na kejdu a masokostní moučku), nejnižší denní produkce bioplynu (6766 m^3) byla v období A (běžný provoz). Dle poznatků získaných při odběru vzorků vstupní směsi, masokostní moučka velmi rychle uvolňuje velké množství bioplynu, naproti tomu kal se začíná rozkládat pozvolněji a vývoj bioplynu je znatelně nižší. Směs kalu, masokostní moučky a kejdy je z pohledu produkce bioplynu méně výhodná než směs kejdy pouze s moučkou, byť s nižším obsahem sušiny. Minimum produkce bioplynu nastalo dne 3.10.2005, kdy bylo spotřebováno nejmenší množství moučky a kalu. **V průběhu období B produkce bioplynu plynule stoupala až na maximální naměřenou hodnotu 8660 m^3 a dne 16.10.2005 došlo k prakticky okamžité změně trendu (pokles produkce) vlivem výpadku jedné dodávky masokostní moučky. Opětovný nárůst nastal teprve dne 18.10.2005 (provoz na moučku).**

Obsah metanu a oxidu uhličitého v bioplynu je uveden v grafu na obrázku 9. Měřený obsah metanu v bioplynu se pohyboval v rozmezí od 64,41 % obj. (dne 28.9.2005) do 70,74 % obj. (dne 3.10.2005), což jsou hodnoty poměrně vysoké. Obě extrémní hodnoty se vyskytly v období A, tedy za běžného provozu. V období B vzrostl průměrný obsah metanu v bioplynu o více než 1 % obj. ve srovnání s obdobím A. Jednoznačně se z tohoto pohledu v kladném směru projevila absence kalu a použití pouze kejdy s masokostní moučkou. V období C, kdy bylo opět spotřebováváno značné množství kalu, klesl obsah metanu na poněkud nižší hodnoty než byl při běžném provozu (v období A).

Obsah oxidu uhličitého se pohyboval stabilně mezi 27 % obj. až 33 % obj. a obsah kyslíku byl rovněž stabilní kolem 0,6 % obj. Výkyvy koncentrací hlavních složek bioplynu ukazují na změny v procesu fermentace. **Bylo potvrzeno zpoždění vlivu změny obsahu sušiny vstupní směsi na produkci bioplynu maximálně dva dny**, což je zřejmé i z grafického zpracování výsledků tohoto měření (viz příloha 2). Obsluha bioreaktorů má tedy reálnou možnost zasáhnout do chodu procesu fermentace a učinit vhodná opatření pro optimální produkci bioplynu.

Výhřevnost bioplynu vypočtená z měřeného obsahu metanu (po přepočtu na normální podmínky) se v průběhu měřeného provozního experimentu měnila v rozmezí od 23 MJ/m_N^3 do 25 MJ/m_N^3 . Průměrná naměřená výhřevnost ($24,26 \text{ MJ/m}_N^3$) je vyšší než hodnota uvedená v provozním řádu bioplynové stanice [103].

5.4.9 Produkce činné elektrické energie

Hrubá činná elektrická energie

Množství vyrobené celkové hrubé činné elektrické energie bylo získáno jako součet hrubé činné elektrické energie vyrobené jednotlivými (šesti) kogeneračními jednotkami. Celková hodinová produkce hrubé činné elektrické energie se pohybovala v průběhu měření od 544 kWh do 724 kWh. Tomu odpovídá denní produkce hrubé činné elektrické energie 13 046 kWh až 17 380 kWh. Minimální produkce elektrické energie (dne 3.10.2005) byla způsobena minimem produkce bioplynu. V tuto dobu se projevil vliv čerpání směsi v předchozích dvou dnech, kdy sice bylo do bioreaktorů čerpáno průměrné množství vstupní směsi, tato směs avšak obsahovala pouze kejdu a kal (jednalo se o sobotu a neděli).

Maximum produkce celkové hrubé činné elektrické energie bylo zaznamenáno dne 15.10.2005, kdy byla již delší dobu čerpána vstupní směs s vysokým podílem masokostní moučky a absencí kalu. V tomto období (zejména dne 14.10.2005) byl obsah sušiny ve vstupní směsi nad svou průměrnou hodnotou.

Průměrná hodinová produkce celkové hrubé činné elektrické energie vztažená na celou dobu měření činí 637 kWh, respektive průměrná denní produkce činí 15282 kWh.

Čistá činná elektrická energie

Činná čistá elektrická energie je nižší než činná hrubá elektrická energie o vlastní spotřebu kogeneračních jednotek (průměrná denní spotřeba šesti kogeneračních jednotek je 901 kWh elektrické energie). Při produkci hrubé činné elektrické energie za 29 dnů měření ve výši 443 185 kWh činila čistá činná elektrická energie 417 056 kWh a činná elektrická energie dodaná do sítě 412 400 kWh, tedy 93 % elektrické energie vyrobené. Množství činné elektrické energie dodané do sítě je nižší než množství činné čisté elektrické energie vyrobené kogeneračními jednotkami o ztráty. Před dodáním energie do rozvodné sítě dochází ke ztrátám. Množství činné elektrické energie je uvedeno v tabulce 33.

Tabulka č. 33: **Produkce bioplynu a činné elektrické energie**

Období	Měřeno			Produkce bioplynu (provozní podmínky)	Produkce bioplynu (normální podmínky)	Produkce hrubé činné elektrické energie	Dodávky činné elektrické energie do sítě
	Den	Datum		[m ³]	[m ³]	[kWh]	[kWh]
A	1	MO	26.9.2005	6986,9	6621,9	14068	13310
	2	TU	27.9.2005	7001,2	6651,2	14233	13330
	3	WE	28.9.2005	6987,8	6639	14199	13290
	4	TH	29.9.2005	7314,9	6939,4	14931	13300
	5	FR	30.9.2005	7230,2	6864,2	14968	13760
	6	SA	1.10.2005	7168,3	6926,9	15000	13000
	7	SU	2.10.2005	6184,2	5978,2	13337	13090
	8	MO	3.10.2005	5980,8	5787	13046	12910
	9	TU	4.10.2005	6314,2	6112,4	13277	12960
	10	WE	5.10.2005	6487,9	6268,7	13731	12940
Průměr za období A				6765,6	6478,9	14079	13189
B	11	TH	6.10.2005	7208,8	6896,3	14853	12880
	12	FR	7.10.2005	6836,2	6541,1	13739	14060
	13	SA	8.10.2005	7636,7	7301,6	15546	13580
	14	SU	9.10.2005	7294,1	6972,9	15352	13640
	15	MO	10.10.2005	7409,2	7087,2	15359	13520
	16	TU	11.10.2005	7744,2	7409,5	16326	15140
	17	WE	12.10.2005	7688,3	7348,6	14901	15340
	18	TH	13.10.2005	8198,7	7838,6	16777	15260
	19	FR	14.10.2005	8656,3	8277,1	17380	15240
	20	SA	15.10.2005	8648,2	8269,3	17180	15710
	21	SU	16.10.2005	8288,3	8006	16775	15770
	22	MO	17.10.2005	7464,8	7225	15556	15660
	23	TU	18.10.2005	7801,4	7549,3	16120	14740
Průměr za období B				7759,6	7440,2	15835,7	14656,9
C	24	WE	19.10.2005	7507,5	7192,1	15970	14950
	25	TH	20.10.2005	7720,6	7395,5	16540	14860
	26	FR	21.10.2005	7794,8	7467	16365	14880
Průměr za období C				7674,3	7351,5	16291,7	14896,7
D	27	SA	22.10.2005	8071,4	7713	16581	15420
	28	SU	23.10.2005	7633,4	7294,6	16030	15460
	29	MO	24.10.2005	7043,3	6643,1	15045	14400
Průměr za období D				7582,7	7216,9	15885	15093
Průměr za celé období sledování				7390	7076	15282	14221
Celkem vyrobeno				214303	205217	443185	412400

Poznámka: Produkce bioplynu a činné elektrické energie v jednotlivých dnech měření se vztahují k časovému intervalu 00⁰⁰ - 24⁰⁰ hodin. Dodávky činné elektrické energie do sítě se vztahují k časovému intervalu 08⁰⁰ - 08⁰⁰ hodin následujícího dne, ale pro zjednodušení jsou zde uvedeny dle prvního časového intervalu. Materiálová a energetická bilance bioplynové stanice uvedená v následujícím odstavci byla vypočtena pro časový interval dne 00⁰⁰ - 24⁰⁰ hodin.

5.4.10 Výsledná bilance systému

Celkové týdenní spotřeby vstupních surovin a celkový objem vyrobeného bioplynu a množství vyrobené elektrické energie ve shodném týdenním období jsou shrnuty v tabulce 34. Pokud vztáhneme produkci bioplynu na jednotku objemu současně čerpané vstupní směsi, vychází produkce bioplynu v období A 34,28 m_N³/m³ směsi, v období B 52,85 m_N³/m³ směsi, v období C 44,11 m_N³/m³ směsi, tedy nejvyšší produkce byla v období při provozu jen s masokostní moučkou. Množství elektrické energie dodané do sítě bylo v období A 69 kWh/ m³ směsi, v období B 104,1 kWh/ m³ směsi a v období C 89,4 kWh/m³ směsi.

Tabulka č. 34: **Materiálová a energetická bilance chodu bioplynové stanice ve sledovaných obdobích A, B, C**

Parametr	Jednotka	Hodnota		
		Období A (10 dnů)	Období B (13 dnů)	Období C (3 dny)
Spotřeba masokostní moučky (MBM) za období	[kg]	80110	185800	49570
Spotřeba dřevního kalu	[kg]	153260	0	48600
Spotřeba vstupní směsi	[m ³]	1890	1830	500
Průměrná denní spotřeba masokostní moučky	[kg/den]	11444	15483	16523
Průměrná denní spotřeba dřevního kalu	[kg/den]	21894	0	24300
Průměrná denní spotřeba vstupní směsi	[m ³ /den]	189	141	167
Produkce bioplynu za období (provozní podmínky)	[m ³]	67656,4	100875,2	23022,9
Produkce bioplynu za období (normální podmínky)	[m _N ³]	64788,9	96722,5	22054,6
Produkce bioplynu z jednotky objemu vstupní směsi (provozní podmínky)	[m ³ /m ³]	35,8	55,1	46,1
Produkce bioplynu z jednotky objemu vstupní směsi (normální podmínky)	[m _N ³ /m ³]	34,3	52,9	44,1
Průměrná denní produkce bioplynu (provozní podmínky)	[m ³ /den]	6765,6	7759,6	7674,3
Průměrná denní produkce bioplynu (normální podmínky)	[m _N ³ /den]	6478,9	7440,2	7351,5
Chemické teplo bioplynu přivedené do kogenerace za období	[MJ]	1627906,7	2470116,7	553596,3
Chemické teplo jednotky objemu bioplynu (provozní podmínky)	[MJ/m ³]	24,06	24,49	24,05
Chemické teplo jednotky objemu bioplynu (normální podmínky)	[MJ/m _N ³]	25,13	25,54	25,10
Chemické teplo bioplynu z jednotky objemu vstupní směsi (normální podmínky)	[MJ/m ³]	861,33	1349,80	1107,19
Produkce činné elektrické energie za období	[kWh]	140790	205864	48875
Produkce činné elektrické energie z jednotky objemu bioplynu (provozní podmínky)	[kWh/m ³]	2,08	2,04	2,12
Produkce činné elektrické energie z jednotky objemu bioplynu (normální podmínky)	[kWh/m _N ³]	2,17	2,13	2,22
Produkce činné elektrické energie z jednotky objemu vstupní směsi	[kWh/m ³]	74,5	112,5	97,8
Průměrná denní produkce činné elektrické energie	[kWh/den]	14079	15836	16292
Dodávky činné elektrické energie do sítě za období	[kWh]	131890	190540	44690
Dodávky činné elektrické energie do sítě z jednotky objemu bioplynu (normální podmínky)	[kWh/m _N ³]	2,04	1,97	2,03
Dodávky činné elektrické energie do sítě z jednotky objemu vstupní směsi	[kWh/m ³]	69,8	104,1	89,4
Průměrné denní dodávky činné elektrické energie do sítě	[kWh/den]	13189	14657	14897
Dodávky činné elektrické energie do sítě z jednotky chemického tepla bioplynu	[kWh/kWh]	0,29	0,28	0,29

Poznámka: Období A, B, C jsou definována v tabulce 25.

5.4.11 Posouzení kvality digestátu

V průběhu provozního měření byly odebrány čtyři vzorky digestátu na výstupu z potrubí odvádějícího tento materiál do nadzemní jímky digestátu umístěné v areálu farmy. Vzorky digestátu byly odebírány v množství cca 1,5 l. U všech čtyř odebraných vzorků digestátu bylo provedeno stanovení obsahu sušiny a ostatních parametrů ve shodném rozsahu jako u vzorků vstupní směsi. Stanovení rizikových prvků, látek a mikroorganismů bylo provedeno pouze u tří vzorků digestátu. Výsledky jsou shrnuty a zhodnoceny (v souladu s níže uvedenými vyhláškami) v tabulkách 14, 15, 16. Protokoly o chemickém a mikrobiálním složení analyzovaných vzorků jsou uloženy na řešitelském pracovišti. Obsah sušiny a další naměřené a vypočtené parametry jsou uvedeny v tabulce 35.

Tabulka č. 35: **Obsah celkové sušiny a další parametry vzorků digestátu**

Vzorek	Odběr vzorku			Celková sušina [% hm.]	N _{celk.} [g/gsušiny]	Ztráta žháním [g/gsušiny]	TOC _{měr.} [g/gsušiny]	%CH ₄ [% obj.]	Y _{CH4/s} [g/gsušiny]	C:N [-]
	Den	Datum	Čas							
Digestát	Friday	16.9.2005	13:30	5,86	0,036	0,558	0,127	82,4	0,009	3,5
Digestát	Monday	17.10.2005	14:00	5,66	0,044	0,557	0,439	23,8	0,011	10,1
Digestát	Wednesday	19.10.2005	14:00	6,73	0,042	0,579	0,397	27,3	0,011	0,1
Digestát	Wednesday	19.10.2005	15:00	10,40	0,034	0,685	0,445	40,8	0,008	13,1
Průměrná hodnota				7,16	0,039	0,595	0,352	43,6	0,010	6,7

Poznámka: Hodnoty %CH₄, Y_{CH4/s} and C:N jsou vypočteny na základě výsledků analýz.

Průměrný obsah sušiny u analyzovaných vzorků digestátu je 7,16 % hm., obsah organických látek je znatelně nižší než u vstupní směsi. Obsah organického uhlíku není o mnoho nižší než u vstupní směsi, což znamená také obdobný poměr C:N. Opětovná anaerobní fermentace digestátu je pravděpodobně možná, bioplyn by obsahoval vysoký podíl metanu, ale výše výtěžku bioplynu je diskutabilní.

Z hlediska obsahu vybraných rizikových látek a prvků (viz tabulka 36) vyhovuje výstupní kapalný produkt bioplynové stanice (digestát) všem požadavkům daným vyhláškou Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb. ve znění 504/2004 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, příloha č. 3 [108] pro použití na zemědělské půdě. Analyzované vzorky digestátu však pro toto použití nevyhovují z hlediska mikrobiálních kritérií. Obsahy kolonií tvořících jednotku stanovených termotolerantních koliformních bakterií a enterokoků značně převyšují limitní hodnoty dané vyhláškou [108] (viz tabulka 37).

Tabulka č. 36: **Porovnání naměřených a vyhláškou [108] stanovených mezních hodnot vybraných rizikových látek a prvků v digestátu**

Sledovaný parametr	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	AOX	PCB
Limitní hodnota [mg/kg sušiny]	30	5	200	500	4	100	200	2500	500	0,6
Naměřená hodnota [mg/kg sušiny]										
vzorek 9337	1,37	1,67	22,5	102	0,152	11,4	7,29	708	100	<0,2
vzorek 9338	2,48	1,71	27,3	101	0,199	12,5	8,29	708	122	<0,2
vzorek 9339	1,09	1,08	20,1	87,5	0,134	10,6	6,25	577	135	<0,2
Posouzení splnění limitních hodnot	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Poznámka: Limitní hodnoty jsou dány vyhláškou Ministerstva životního prostředí ČR č. 382/2001 Sb., přílohou č. 3. Nejistota měření nepřekračuje 20 %.

Výstupní tekutý produkt fermentace stále obsahuje vysoký obsah celkové sušiny respektive značný obsah organických látek. Vysvětlení lze hledat v nízkém stupni přeměny těchto látek na bioplyn, případně v růstu nové anaerobní biomasy (masa bakterií) během anaerobního zpracování. Zda došlo procesem anaerobní digesce k dostatečné přeměně masokostní moučky na produkt neohrožující životní prostředí by mělo být předmětem dalšího zkoumání. Dostatečnou dobou skladování fermentátu se jeho parametry pravděpodobně upraví. Dle [114] by se měl fermentát na zemědělské půdě zaorávat nejméně 15 až 20 cm hluboko z důvodu nebezpečí rozmnožení nežádoucích mikroorganismů Clostridia.

Tabulka č. 37: **Porovnání naměřených a vyhláškou [108] stanovených mezních hodnot mikrobiálního složení digestátu**

Sledovaný parametr	Termotolerantní koliformní bakterie	Enterokoky	Salmonela
Limitní hodnota [KTJ/g sušiny]	<10 ³	<10 ³	Negativní nález
Naměřená hodnota [KTJ/g sušiny]			
vzorek 9337	8,8x10 ⁵	1,6x10 ⁶	Negativní nález
vzorek 9338	6,6x10 ⁵	1,0x10 ⁶	Negativní nález
vzorek 9339	3,8x10 ⁵	5,8x10 ⁶	Negativní nález
Posouzení splnění limitních hodnot	nevyhovuje	nevyhovuje	vyhovuje

Poznámka: Limitní hodnoty jsou dány vyhláškou Ministerstva životního prostředí ČR č. 382/2001 Sb., přílohou č. 4. Nejistota měření nepřekračuje 20 %. KTJ je kolonie tvořící jednotku (základní soubor mikroorganismů).

5.4.12 Shrnutí a závěry z provedeného měřeného provozního experimentu

Produkce elektrické energie závisí na vyrobeném množství a výhřevnosti bioplynu; procesní regulace těchto faktorů ve společnosti GT 92, s.r.o. Velké Albrechtice je možná formou organizačních opatření a úpravou stávajícího systému zvyšování obsahu sušiny ve zpracovávané prasečí kejďě, navržených na základě závěrů z provedeného měřeného experimentu.

Z výsledků provozního experimentu lze usuzovat, že možnost ovlivnění produkce elektrické energie změnou vlastností vstupní směsi je významná. Čím rovnoměrnější je dodávání vstupních surovin do bioreaktorů, tím plynulejší je i produkce bioplynu a v návaznosti i produkce elektrické energie. Z jednoho metru krychlového vstupní směsi je v současnosti při běžném provozu (období A) vyráběno přibližně 34 m_N³ bioplynu, tedy přibližně 23 m_N³ metanu. Z jednoho metru krychlového vstupní směsi je při běžném provozu vyráběno 74,5 kWh hrubé činné elektrické energie, respektive je odváděno do sítě 69,8 kWh činné elektrické energie. V období B bylo z jednoho metru krychlového vstupní směsi vyráběno až 52 m_N³ bioplynu a z jednoho metru krychlového vstupní směsi bylo vyrobeno 112,5 kWh hrubé činné elektrické energie, respektive bylo odváděno do sítě 104,1 kWh činné elektrické energie. V období C bylo z jednoho metru krychlového vstupní směsi vyráběno v průměru 44 m_N³ bioplynu a tedy 97,8 kWh hrubé činné elektrické energie, respektive bylo odváděno do sítě 89,4 kWh činné elektrické energie.

Z provedených analýz vzorků vstupní směsi vyplývá zřetelný pokles obsahu sušiny o nedělích; toto by bylo vhodné upravit záměnou některé dodávky kalu za MBM. Změny vstupních surovin se na produkci bioplynu projevují během několika hodin, opětovné ustálení na průměrné hodnotě produkce nastává do jednoho až dvou dnů.

Na základě provedených analýz chemického a mikrobiálního složení digestátu nelze tento materiál označit za vyhovující pro aplikaci na zemědělské půdě. Lze také předpokládat, že několikaměsíčním skladováním se nevyhovující naměřené hodnoty obsahu mikroorganismů v digestátu mohou dále upravit v pozitivním smyslu.

Obecně je složení vsázky pro anaerobní bioreaktory účelné regulovat tak, aby bylo dosaženo optimálního průběhu procesu mokré fermentace, to je, aby produkce bioplynu i obsahu metanu v něm byla na co nejvyšší konstantní úrovni při konstantním zatížení bioreaktoru. Dosažení tohoto cíle, to je regulované zvýšení produkce bioplynu, případně jeho výhřevnosti, je možné zejména cestou časového zrovnoměření přídavků kalu a MBM, případně i za současného zvyšování celkového obsahu sušiny.

Základním problémem při zvyšování produkce bioplynu je skutečnost, že dosažení optimálních hodnot parametrů pro teoreticky maximální produkci bioplynu může být v rozporu s optimálními hodnotami ostatních významných parametrů, které ovlivňují stabilitu procesu fermentace. Skutečnost, zda dojde k narušení stability anaerobního procesu vlivem změny parametrů teoreticky použitelných pro navýšení produkce bioplynu není předem snadno odhalitelná. Jak již bylo uvedeno, nejdůležitější faktory ovlivňující stabilitu mokré anaerobní fermentace jsou zejména obsah sušiny fermentovaného materiálu, chemická spotřeba kyslíku, obsah celkového organického uhlíku, poměr C:N, teplota v průběhu zrání, pH a homogenita materiálu. Mokrá fermentace je flexibilní proces, proto není bezpodmínečně nutné dodržovat neustále neoptimálnější podmínky. Nicméně neoptimálnější podmínky znamenají jistotu stability procesu a vysokou produkci bioplynu. Pokusné zvyšování produkce bioplynu v provozních podmínkách může znamenat příliš vysoké riziko. Z tohoto důvodu je vhodné zaměřit pozornost i na teoretické a případně i modelové či poloprovozní možnosti řešení a z toho plynoucí predikci volby optimálních podmínek.

6 KONTROLA A ŘÍZENÍ PROCESU MOKRÉ ANAEROBNÍ DIGESCE

Mokrý anaerobní digesce je souborem celé řady dílčích procesů, probíhajících v dynamické rovnováze. Pro stabilní chod anaerobního procesu je potřeba zajistit pokud možno neměnné podmínky, optimální pro souběh všech dílčích dějů. Optimální podmínky byly již dříve zmíněny (viz kapitola 3). Nestabilita procesu (narušení dynamické rovnováhy nezi hydrolýzou, acidogenezí, acetogenezí a metanogenezí) nastává při vážnějších změnách podmínek procesu. Pro řízení procesu mokré anaerobní digesce organických substrátů neexistuje jednotná strategie, aplikovatelná na všechny případy [61]. Správně probíhající anaerobní proces se projevuje vysokou produkcí bioplynu s malými denními výkyvy, malými změnami v poměru složek bioplynu CH_4/CO_2 a stabilním stupněm rozkladu celkové sušiny okolo 50 %.

Nejvýznamnějším a prvořadým faktorem, kterým můžeme ovlivňovat stabilitu a průběh procesu fermentace je teplota v reaktoru. Tento faktor ovšem není vhodný pro řízení kontinuálně probíhajícího průmyslového procesu anaerobní fermentace, neboť je obtížné dostatečně rychle měnit teplotu v celém bioreaktoru a navíc fermentační mikroorganismy reagují na náhlé změny teploty negativně a s příliš dlouhodobými následky. Dávkování speciálního inokula je stabilizační metoda účinná, ale neekonomická. Dávkování chemických látek pro optimalizaci pH v bioreaktoru a pro doplnění některých nezbytných živin anaerobním bakteriím rovněž není nejvhodnější způsob regulace procesu, neboť neřeší prvotní příčinu jeho nestability (nevhodnost některých složek zpracovávaného substrátu). Přesto se mnohdy prosté dávkování alkálií pro zvýšení pH reagující směsi na hodnotu vhodnější pro metanogeny (udržování neutralizační kapacity substrátu) provádí a v určitých případech bývá i nezbytné [61].

Nejpoužitelnějším způsobem regulace průběhu procesu mokré anaerobní kofermentace v bioplynové stanici je *změna zatížení bioreaktoru* (změna rychlosti dávkování substrátu nebo jeho látkového složení). Snížením (nebo pozastavením) přítoku substrátu (vstupní směsi), změnou četnosti dávkování, změnou velikostí dávek vstupní směsi případně regulací jejího složení lze odstranit příčiny nestability procesu [4]. Vzhledem ke komplexnosti anaerobních rozkladných dějů nelze jednoznačně předepsat, které chemické či fyzikální vlastnosti substrátu je vhodné ovlivňovat a řídit tak anaerobní proces [101]. Možnost ověření účinků konkrétních změn substrátu na modelu nebo na poloprovozním zařízení přispívá k stabilitě chodu procesu na skutečném díle. V každém případě se doporučuje změny složení substrátu provádět pozvolně.

Prvním krokem řízení anaerobního procesu je tedy volba reakční teploty. Při dané reakční teplotě již můžeme proces řídit jen změnou zatížení bioreaktoru, neboť jak již bylo zmíněno, strategie založená na dávkování chemických nutrientů neřeší vlastní příčinu nestability a neřiditelnosti procesu kofermentace (přetížení nebo intoxikace). Při způsobu řízení kontinuálního anaerobního procesu změnou zatížení bioreaktoru jsou optimální podmínky dosahovány kontrolovanou rychlostí přítoku vstupní směsi, respektive kontrolovaným dávkováním vstupní směsi, kontrolovanou změnou obsahu sušiny nebo kontrolovanou změnou látkového složení směsi (např. obsahu tuků nebo celulózy). Počínající nestabilitě procesu lze tak předcházet snížením dávek vstupní směsi, delší prodlevou mezi jednotlivými dávkami nebo snížením

koncentrace organických látek ve vstupní směsi [17]. V praxi je často jako nejeekonomičtější varianta řízení anaerobního procesu používáno řízení dávkováním chemikálií pro udržení neutralizační kapacity reagující směsi a teprve v okamžiku, kdy se anaerobní proces ocitne na hranici stability, nastupuje strategie řízení regulací přítoku, eventuálně jeho složení.

Jako výhodné se jeví předřazení rozměrné vyrovnávací nádrže (vstupní jímky), z níž je do bioreaktoru čerpána vstupní směs s rovnoměrnějším složením (z časového hlediska). Tato vyrovnávací nádrž zároveň poskytuje čas potřebný pro nastartování acidifikačních procesů.

Identifikace správného zatížení bioreaktoru se v praxi ve většině případů provádí monitorováním pouze jediné proměnné, a to produkce bioplynu (případně produkce metanu). Bioreaktor je udržován spíše při nízkém zatížení a mikroorganismy jsou spíše v útlumovém stavu. Produkce bioplynu je málo citlivá proměnná, reaguje s určitým zpožděním, proto neustále hrozí riziko neodhaleného přetížení bioreaktoru. Řízení je závislé na dlouhodobých zkušenostech obsluhy s produkcí bioplynu ze známých zpracovávaných materiálů.

Řízením kontinuálního mokrého anaerobního procesu na zemědělské bioplynové stanici pomocí regulace zatížení bioreaktoru změnami přítoku a složení vstupní směsi se zabývají následující kapitoly.

6.1 Zkušenosti s kontrolou a řízením procesu mokré anaerobní digesce na zemědělské bioplynové stanici firmy GT92. s.r.o. ve Velkých Albrechticích

Provedené měřené experimenty na zemědělské bioplynové stanici firmy GT92. s.r.o. ve Velkých Albrechticích prokázaly, že změnou skladby vstupní směsi lze významně ovlivnit produkci bioplynu a výrobu elektrické energie. Produkce elektrické energie je závislá na získaném chemickém teple bioplynu (na vyrobeném množství a výhřevnosti bioplynu); regulace těchto faktorů je možná formou organizačních opatření a úprav stávajícího systému zvyšování obsahu sušiny zpracovávané prasečí kejdy, navržených na základě závěrů z provedeného ověření chodu současné technologie (viz kapitoly 5.2, 5.3 a 5.4). Ovšem je potřeba mít na paměti přípustné zatížení bioreaktorů (udržení stability procesu).

Obecně je složení vsázky pro anaerobní bioreaktory účelné regulovat tak, aby bylo dosaženo optimálního (ustáleného) průběhu procesu mokré fermentace, to je, *aby produkce bioplynu byla na co nejvyšší konstantní úrovni při konstantním zatížení bioreaktoru*. V produkovaném bioplynu je nezbytné obsah metanu udržovat rovněž na pokud možno konstantní a nejvyšší dosažitelné úrovni.

Dosažení tohoto cíle, to je regulovaného zvýšení produkce bioplynu, případně jeho výhřevnosti bez narušení stability anaerobního procesu, je v zemědělské bioplynové stanici firmy GT92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích předpokládáno zejména cestou časového zrovnoměnění přídávků kalu a masokostní moučky (MBM), případně i za současného zvyšování celkového obsahu sušiny vstupní směsi a zpracovávání i jiných kofermentovatelných materiálů v menším měřítku.

Základním problémem při zvyšování produkce bioplynu je však skutečnost, že dosažení optimálních hodnot parametrů pro teoreticky maximální produkci bioplynu může být v rozporu s optimálními hodnotami ostatních významných parametrů, které ovlivňují stabilitu procesu

anaerobní digesce. Skutečnost, zda dojde k narušení stability anaerobního procesu vlivem změny parametrů teoreticky použitelných pro navýšení produkce bioplynu není předem snadno odhalitelná. Jak již bylo uvedeno dříve, nejdůležitější faktory ovlivňující stabilitu mokré anaerobní fermentace jsou zejména reakční teplota, pH a homogenita materiálu, obsah organické sušiny (obsah organických látek) fermentovaného materiálu (alternativně chemická spotřeba kyslíku), obsah celkového organického uhlíku, poměr C:N aj. Mokrá anaerobní digestce je flexibilní proces, proto není bezpodmínečně nutné dodržovat neustále neoptimálnější podmínky. Nicméně neoptimálnější podmínky znamenají jistotu stability procesu a vysokou produkci bioplynu. Pokusné zvyšování produkce bioplynu v provozních podmínkách více méně náhodnými změnami vlastností vstupní směsi může pro provozovatele znamenat příliš vysoké ekonomické riziko. Nejen z tohoto důvodu je následující kapitola zaměřena na teoretické možnosti řešení regulace mokrého anaerobního procesu a predikci volby optimálních podmínek.

6.2 Rozbor parametrů vhodných pro řízení mokrého anaerobního procesu

6.2.1 Cíl řízení kontinuálního mokrého anaerobního procesu

Cílem řízení kontinuálního mokrého anaerobního procesu je zajištění jeho stability při maximální dlouhodobě dosažitelné produkci bioplynu s maximálním dlouhodobě dosažitelným obsahem metanu. Při řízení procesu se vedle udržování základních fyzikálních, chemických a mikrobiologických podmínek v bioreaktoru v první řadě jedná o přípravu takové vstupní směsi, která bude mít chemické parametry nejvýhodnější z hlediska výše definovaného cíle řízení. Je tedy zřejmé, že více než o skutečné řízení chodu anaerobního procesu se v podmínkách zemědělských bioplynových stanic jedná více méně o optimalizační opatření na straně vstupů, jimiž se provozovatel snaží dosáhnout zmíněného cíle. Z toho důvodu je dále diskutována především optimalizace anaerobního procesu a pojmu řízení je vyhýbáno.

V případě semi-kontinuálního dávkování vstupní směsi (nejběžnější způsob na zemědělských bioplynových stanicích) je potřeba zajistit dávky vstupní směsi s optimální četností, velikostí a chemickými parametry. Chemické parametry dávky vstupní směsi se nesmí s každou novou připravenou dávkou významně měnit, nebo se mohou měnit plynule, nikoliv skokem.

Na základě teoretických podkladů a dosavadních subjektivních zkušeností obsluhy bioplynové stanice je potřeba definovat sledované parametry u dávky vstupní směsi, podle nichž se bude provádět následná optimalizace složení dávek navazujících. Optimalizaci složení navazujících dávek vstupní směsi je účelné provádět pomocí osobního počítače obsluhy bioreaktoru, který poskytne všechny potřebné informace v dostatečně krátkém čase.

Počítačová optimalizace složení dávek vstupní směsi by měla vycházet z vhodně sestaveného matematického modelu a verifikovaného počítačového programu. Kontrolu rovnoměrnosti výroby bioplynu při stabilizaci anaerobního procesu počítačovou optimalizací dávek vstupní směsi je možno provádět sledováním denních spotřeb bioplynu kogeneračními jednotkami pomocí centrálního plynoměru, neboť množství skladovaného bioplynu ve vyrovnávacím plynojemu lze udržovat na přibližně konstantní úrovni a veškerý vyrobený bioplyn lze prakticky okamžitě spotřebovávat. Záložní výrobní kapacita kogeneračních jednotek

pro případ experimentálního či provozního zvýšení produkce bioplynu počítačově řízenou změnou vlastností vstupní směsi by ovšem měla být zabezpečena taktéž.

6.2.2 Kritéria pro výběr vstupní směsi

Nejdůležitějšími kritérii pro výběr optimální vstupní směsi zabezpečující konstantní chod mokrého anaerobního procesu při vysoké produkci bioplynu jsou:

- 1) udržení obsahu celkové sušiny vstupní směsi na nejvyšší možné konstantní úrovni - dáno čerpatelností (obvykle maximálně 14 % hm.);
- 2) udržení obsahu organických látek ve vstupní směsi na nejvyšší konstantní úrovni (např. kolem 0,7 g/g_{sušiny}) při splnění kritéria 1;
- 3) udržení obsahu celkového organického uhlíku na nejnižší konstantní úrovni (např. kolem 0,4 g/g_{sušiny}) při splnění kritérií 1 a 2;
- 4) udržení obsahu sacharidů, lipidů a proteinů na nejvyšší konstantní úrovni (obsah celulózy, hemicelulózy a ligninu na nejnižší konstantní úrovni) při splnění kritérií 1, 2 a 3.

ad 1) Udržení obsahu celkové sušiny ve vstupní směsi na nejvyšší možné konstantní úrovni

Obsah celkové sušiny TS ve vstupní směsi by měl být udržován na konstantní hodnotě, která bude nejvyšší s ohledem na míchatelnost a čerpatelnost do bioreaktoru (dle dosavadních zkušeností obsluhy). Směs kofermentovatelných materiálů se v bioplynové stanici připravuje v míchací jímce o pracovním objemu např. 300 m³. Přivezené známé množství kosubstrátů 1 až n je vsypáno do míchací jímky, ve které je nevyčerpaný zbytek předchozí dávky vstupní směsi. Jímku je třeba doplnit vždy takovým množstvím tekutého základního substrátu (např. prasečí kejdy), aby obsah celkové sušiny ve vzniklé dávce vstupní směsi byl přibližně 11 % hm., případně aby tento obsah zůstal v intervalu 8 % hm. až 14 % hm (hodnotu zvolí obsluha bioreaktoru na základě dřívějších zkušeností s čerpatelností směsi a vývinem bioplynu).

Objem základního substrátu, potřebný pro vytvoření dávky vstupní směsi o žádané hodnotě obsahu sušiny při znalosti množství dovezeného 1. až n-tého kosubstrátu a objemu směsi zbylé od posledního míchání (se známými obsahy celkové sušiny) lze vypočítat ze směšovací rovnice podle vztahu (2).

Příkladně objem základního substrátu potřebný pro přípravu dávky 300 m³ vstupní směsi o obsahu celkové sušiny 11 % hm.:

$$V_{zs} = \frac{300 * \rho_{vs} * 11 - \rho_z * V_z * 11 - m_1 * TS_1 - m_2 * TS_2 - \dots - m_n * TS_n}{\rho_{zs} * TS_{zs}}, m^3 \quad (2)$$

kde:

V_{zs} - objem základního substrátu, který je potřeba doplnit, m³

V_z - objem zbytku předchozí dávky vstupní směsi zbylé v jímce, m³

m_1 - hmotnost prvního kosubstrátu, kg

m_n - hmotnost n-tého kosubstrátu, kg

TS_1 - obsah celkové sušiny v prvním kosubstrátu, % hm.

TS_n - obsah celkové sušiny v n-tém kosubstrátu, % hm.

TS_{zs} - obsah celkové sušiny v základním substrátu, % hm.

ρ_{vs} - měrná hmotnost připravované dávky vstupní směsi, kg/m^3

ρ_{zs} - měrná hmotnost základního substrátu, kg/m^3

ρ_z - měrná hmotnost zbytku předchozí dávky vstupní směsi zbylé v jímce, kg/m^3

300 - pracovní objem míchací jímky, m^3

$TS_{vs} = 11$ je obsah celkové sušiny v dávce vstupní směsi, % hm.

Jako veličinu sledovanou při tvorbě (výběru) dávky vstupní směsi s optimálními vlastnostmi (z pohledu dosažení cíle optimalizace procesu, tedy vytváření dávek vstupní směsi s pokud možno neměnnými nebo alespoň ne skokem se měnícími vlastnostmi) je možno vzít veličinu - obsah celkové sušiny TS_c udávanou v % hm. Sledována bude její konstantnost na zvolené maximální hodnotě.

ad 2) Udržení obsahu organických látek ve vstupní směsi na nejvyšší konstantní úrovni při splnění kritéria 1

Obsah organických látek ve vstupní směsi je rozhodujícím faktorem pro výši produkce bioplynu. Čím vyšší bude obsah organických látek OL ($\text{g/g}_{\text{sušiny}}$) respektive obsah organické sušiny oTS (% hm.) tím více bioplynu může teoreticky vzniknout. Důležité je ovšem dodržení ostatních podmínek anaerobního procesu (viz kapitola 3). Obsah organických látek vstupní směsi závisí na obsahu organických látek v jednotlivých dílčích kosubstrátech a na poměru těchto kosubstrátů. Obsluha bioreaktoru na základě dosavadních zkušeností rozhodne o maximálním zastoupení organických látek, které je z dlouhodobého pohledu udržitelné.

Obsah organických látek ve vodnatých kosubstrátech je možno sledovat stanovením hodnoty CHSK_{Cr} vstupní směsi. Protože jsou často kofermentovány tuhé materiály nebo materiály s vysokým obsahem celkové sušiny, kde obsah nerozpuštěných látek přesahuje 1g/l , je výhodné nahradit stanovení CHSK_{Cr} stanovením organických látek (OL) oxidací kyselinou chromovou za přítomnosti nadbytku kyseliny sírové nebo snadněji stanovením ztráty žíháním sušiny (ZŽ) při teplotě $(550 \pm 10)^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti dle normy ČSN 83 0550 [119].

Výtěžnost metanu potažmo bioplynu z jednotlivých surovin, které připadají v úvahu pro zpracování mokrou fermentací (prasečí kejda, dřevní kaly, masokostní moučka, kukuřičná a jiná siláž, kuchyňské biologické odpady, travní hmota aj.) se značně liší. Pomineme-li odlišnost optimálních podmínek anaerobního rozkladu každého z těchto materiálů a z toho vyplývající odlišný stupeň rozkladu při společném zpracování, lze teoreticky odhadnout množství metanu vyprodukovaného z jednotkové hmotnosti anaerobně zpracované sušiny na základě znalosti obsahu organických látek - chemické spotřeby kyslíku CHSK (alternativně ztráty žíháním ZŽ) (viz níže uvedený vztah (3)).

Teoretická měrná produkce metanu

Teoretickou měrnou produkcí metanu $Y_{\text{CH}_4/s}$ lze vyjádřit vztahem (3). Aby byla tato produkce co nejvyšší, je potřeba u vstupní směsi dosáhnout co nejvyšší hodnoty obsahu organických látek (CHSK) při co nejnižších hodnotách korekčních faktorů ($N_{\text{NO}_2}, N_{\text{NO}_3}, S_{\text{celk}}$) [4].

$$Y_{CH_4/s} = 0,25 * (CHSK - N - S), \text{ g/g}_{\text{substrátu}} \quad (3)$$

kde:

$CHSK$ - měrná chemická spotřeba kyslíku, g/g_{sušiny}

N - kyslíkový ekvivalent dusitanového a dusičnanového dusíku,

$N = 2,86 * (N_{NO_2} + N_{NO_3}), \text{ g/g}_{\text{sušiny}}$

S - kyslíkový ekvivalent síry, $S = 2 * S_{celk}, \text{ g/g}_{\text{sušiny}}$

Jako veličinu sledovanou při výběru dávky vstupní směsi s optimálními vlastnostmi (z pohledu dosažení cíle optimalizace procesu) je možno vzít veličinu $CHSK$ nebo $CHSK - (N_{NO_2} + N_{NO_3} + S_{celk})$ udávanou v g/g_{sušiny} nebo v % hm. Obsahy dusitanového a dusičnanového dusíku a celkové síry jsou ve vztahu (3) pouze korekčními členy, rozhodující vliv na teoretickou produkci metanu má hodnota obsahu organických látek ($CHSK$). Obsahy dusitanového a dusičnanového dusíku jsou u některých zpracovávaných materiálů (prasečí kejda, dřevní kal, masokostní moučka) zanedbatelné. Totéž nelze jednoznačně říci o obsahu celkové síry.

Pro rychlejší orientaci v přepočtech teoretické produkce metanu a $CHSK$ substrátu lze použít tabulku 38 [4]:

Tabulka č. 38: Přepočtové koeficienty mezi CH_4 a $CHSK$

1 mol CH_4	2 moly O_2
	64 g $CHSK$
	22,4 dm ³
1 g $CHSK$	0,25 g CH_4
	0,35 dm ³ CH_4
1 g CH_4	4 g $CHSK$
	1,4 dm ³
1 dm ³ CH_4	2,857 g $CHSK$

ad 3) Udržení obsahu celkového organického uhlíku na nejnižší konstantní úrovni při splnění kritérií 1 a 2

Obsah celkového organického uhlíku TOC (g/g_{sušiny}) ve vstupní směsi závisí na obsahu organického uhlíku v jednotlivých surovinách a na poměru těchto surovin. Čím vyšší bude poměr obsahu organických látek k obsahu celkového organického uhlíku ve vstupní směsi, tím teoreticky vyšší bude obsah metanu ve vzniklém bioplynu. Obsluha bioreaktoru na základě dosavadních zkušeností rozhodne o minimálním podílu celkového organického uhlíku, který je z dlouhodobého pohledu udržitelný.

Ze znalosti obsahu celkového organického uhlíku a organických látek lze odhadnout teoretickou hodnotu koncentrace metanu % CH_4 ve vznikajícím bioplynu dle vztahu (4) [4]. Důležité je ovšem i dodržení přijatelného poměru všech ostatních živin (viz kapitola 3).

Teoretická koncentrace metanu v bioplynu

$$\%CH_4 = 18,75 * (CHSK / TOC), \% \text{ obj.} \quad (4)$$

kde: $CHSK$ - měrná chemická spotřeba kyslíku, g/g sušiny

TOC - měrný obsah organického uhlíku (C_{org}), g/g sušiny

Jako veličinu sledovanou při výběru dávky vstupní směsi s optimálními vlastnostmi (z pohledu dosažení cíle optimalizace procesu) je možno vzít veličinu %CH₄ v % obj. nebo bezrozměrný parametr *CHSK/TOC*.

ad 4) Udržení obsahu sacharidů, lipidů a proteinů na nejvyšší konstantní úrovni při splnění kritérií 1, 2 a 3

Monosacharidy, lipidy a proteiny jsou snadno anaerobně rozložitelné organické látky. Naproti tomu celulóza, hemicelulózy a lignin jsou obtížněji anaerobně rozložitelné (viz kapitola 3). Jako veličinu sledovanou při výběru dávky vstupní směsi s optimálními vlastnostmi (z pohledu dosažení cíle optimalizace procesu) je možno vzít sumární veličinu {obsah sacharidů + lipidů + proteinů} v g/g_{sušiny} nebo % hm., jejíž optimální hodnotu opět určí obsluha bioreaktoru na základě dlouhodobých zkušeností.

7 DATABÁZE VLASTNOSTÍ ANAEROBNĚ FERMENTOVATELNÝCH MATERIÁLŮ

7.1.1 Tvorba databáze

Jako součást hledání možností optimalizace anaerobního zpracovávání organických materiálů byly zahájeny práce na vytváření databáze zahrnující všechny potenciálně kofermentovatelné materiály (odpady) a jejich hlavní technologické vlastnosti. Databáze byla nazvána “Databáze vlastností anaerobně fermentovatelných materiálů“. Jako podklad pro vytvoření databáze byla použita již existující databáze vlastností spalitelných materiálů vytvořená Centrem environmentálních technologií VŠB – TU Ostrava v rámci řešení dřívějších projektů, především projektu resortního programu Ministerstva životního prostředí ev. č. VaV/720/16/03 „Výzkum spalování odpadů“ [120]. Z databáze vlastností spalitelných odpadů (uvedena rovněž v literatuře [121], [122]) byly vyjmuty anaerobně nerozložitelné materiály (odpady) a databáze byla doplněna o řadu materiálů potenciálně anaerobní digestí zpracovatelných, ať již mokrou či suchou cestou. Zahrnuty byly všechny významné zemědělské bioodpady (především statková hnojiva), krmiva a odpady a materiály ze zpracovatelského průmyslu včetně specifických a speciálních odpadů jako např. masokostní moučka či jateční odpady. Databázovány jsou zde biologicky rozložitelné odpady z průmyslu potravinářského, mlékárenského, lihovarnického, pivovarnického, dřezozpracujícího, papírenského, obuvnického, textilního, kožedělného, metalurgického a strojírenského, chemického, farmaceutického, průmyslu výroby biopaliv a rovněž z odvětví lidské činnosti jako je lesnictví, zahradnictví, provoz jídelen a velkokuchyní. Dále byly zahrnuty vytríděné složky komunálního odpadu i celá jeho biologická frakce. Databázi doplňují záměrně pěstované energetické rostliny a pomocné chemické látky, vhodné jako přídavky pro stabilizaci anaerobního fermentačního procesu (stabilizátory pH či pufrací kapacity).

Databáze je již v tomto okamžiku dosti obsáhlá, zahrnuje cca 370 různých materiálů. U přibližně 240-ti materiálů jsou již proměřeny hlavní materiálové parametry (jednotnou metodikou) a doplňování materiálů a jejich parametrů bude postupně uskutečňováno v rámci řešení výzkumného projektu Ministerstva průmyslu a obchodu IMPULS IF-IM4/0089 „Výzkum a vývoj nových technologií kofermentace zemědělských odpadů a dalších biogenních materiálů s cílem zvýšení energetické a ekonomické efektivity procesu“ na Centru environmentálních technologií VŠB – TU Ostrava ve spolupráci s firmou Vítkovice – ENVI, a.s. v letech 2007 až 2010 [123].

Databáze obsahuje tyto laboratorně stanovené parametry kofermentovatelných materiálů: obsah celkové sušiny (total solids TS), obsah organické sušiny (oTS), obsah celkového organického uhlíku (TOC), poměr C:N, pH, obsah celkového dusíku (N_{celk}), obsah amoniakálního dusíku (N_{NH_4}), obsah fosforu vyjádřený jako P_2O_5 , obsah vápníku vyjádřený jako CaO, obsah celkové síry (S_{celk}), obsah sacharidů, lipidů, proteinů, celulózy a ligninu.

Využití databáze je předpokládáno především pro připravovaný počítačový program řízení mokrého anaerobního procesu formou optimalizace složení a vlastností vstupní směsi při současné kontrole několika základních procesních ukazatelů. Chemické parametry

databázovaných materiálů budou uplatněny jako hlavní vstupní data tohoto databázového programu.

Ověření možností využití této databáze pro optimalizaci nebo řízení anaerobního procesu je předpokládáno při laboratorních a poloprovodních experimentech, i při provozních experimentech na bioplynové stanici v Pustějově, jež budou uskutečněny v rámci řešení výzkumného projektu [123].

Analýza databázovaných materiálů (odpadů)

Vlastní analýza odebraných reprezentativních vzorků biomateriálů vyžadovala splnění poměrně přísných požadavků především na granulometrii a homogenizaci tuhých vzorků. Použito bylo jednotných laboratorních postupů. Laboratorní nožový mlýn LMN firmy Testchem sloužil k mletí a zjemňování tuhých materiálů (odpadů). Na takto připraveném vzorku byl proveden síťový rozbor na prosévacím zařízení Testchem-PRP.

Obsah celkové sušiny byl stanoven dopočtem ze známého obsahu vlhkosti, stanoveného na termogravimetrickém analyzátoru LECO TGA 601. Obsah organické sušiny byl stanoven jako obsah hořlaviny při 815 °C odpočtením obsahu popela od obsahu celkové sušiny. Rozdíl takto získané hodnoty a běžně udávané hodnoty ztráty žíháním sušiny při 550°C je nevýznamný. Vzniklá chyba je v podstatě zanedbatelná, protože u většiny biomateriálů se látky, které vyvolávají rozdíl mezi obsahem popelovin a obsahem popela (uhličitany, sulfidy, soli s krystalovou vodou) vyskytují v omezené míře. Větší chybu lze očekávat u materiálů majících povahu koloidní suspenze.

Elementární analýza byla provedena na plynovém chromatografu EURO EA – 3000. Obsah celkového chloru byl stanoven podle normového postupu, kdy byl vzorek bioodpadu spálen v kalorimetrické bombě, převeden do roztoku a stanoven obsah celkového chloru metodou iontové chromatografie jako Cl⁻ na iontovém chromatografu firmy Waters.

Ukázka z databáze vlastností anaerobně fermentovatelných materiálů je uvedena v tabulce 39. Vlastní Databáze vlastností anaerobně fermentovatelných materiálů je v příloze č. 3.

Tabulka č. 39: Ukázka z Databáze vlastností anaerobně fermentovatelných materiálů

Zemědělství																							
Značení vzorku	Materiál (odpad)	C	H	N	S	O	Cl	A	W	Č	TS	oTS	C:N	pH	N _{celk}	N _{NH4}	P ₂ O ₅	CaO	sacharidy	lipidy	proteiny	celulóza	lignin
		[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[-]	[-]	[hm.%TS]	[hm.%TS]	[hm.%TS]	[hm.%TS]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]
C1	hověží hnůj	8,1	1	0,3	0	6,2	0,04	3,6	80,8	15,5	19,2	15,5	27										
R1	hověží kejda	2,4	0,4	0,4	0,0	2,9	0,1	2,0	91,94	6,1	8,1	6,1	6,7										
C2	hovězí kejda**	21,3	3,2	3,2	0,2	25,7	0,67	15,4	31,1	53,5	68,9	53,5	6,7										
C3	králíčí trus	11,8	1,6	0,7	0,1	11,4	0,29	5,4	69,1	25,5	30,9	25,5	16,9										
C4	holubi trus	19,2	2,8	3	0,1	11,8	0,09	22,2	40,9	36,9	59,1	36,9	6,4										
C5	prasečí hnůj	11,2	1,5	0,9	0,1	6,6	0,08	3,8	76	20,2	24	20,2	7,5										

Poznámka: Databáze byla sestavena z dat získaných v průběhu řešení dřívějších projektů, především projektu „Výzkum spalování odpadů“ [120] a bude postupně doplňována v průběhu řešení výzkumného projektu „Výzkum a vývoj nových technologií kofermentace zemědělských odpadů a dalších biogenních materiálů s cílem zvýšení energetické a ekonomické efektivity procesu“ [123].

8 NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU OPTIMALIZACE ANAEROBNÍHO PROCESU

Byl navržen matematický model pro optimalizaci tvorby vstupní směsi kofermentovatelných materiálů. Matematický model umožňuje navrhnout (vybrat) optimální složení vstupní směsi či změny mísení kofermentovatelných surovin tak, aby bylo dosaženo cíle řízení (optimalizace) kontinuálního mokrého anaerobního procesu, uvedeného ve stati 6.2.1. Předpokládán je návrh (vývoj) a verifikace počítačového programu pracujícího na základě tohoto matematického modelu a určeného pro výzkumné účely i pro potřeby obsluhy zemědělských nebo komunálních bioplynových stanic.

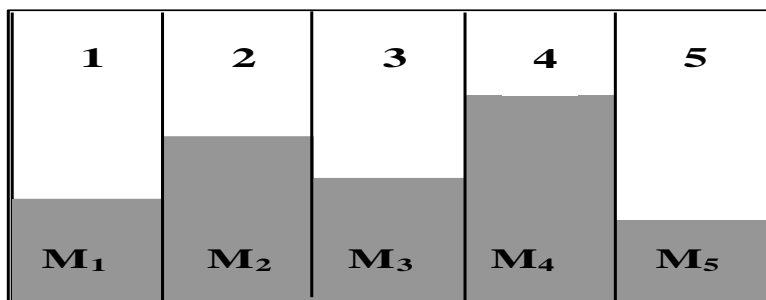
V teoretické části práce (stať 3.3) byly uvedeny hlavní parametry vstupní směsi (vsázky anaerobních bioreaktorů) mající vliv na produkci bioplynu. Zásadním problémem při sestavování matematického modelu optimalizace tvorby vstupní směsi je skutečnost, že chemická spotřeba kyslíku CHSK není aditivní vlastností, tedy výpočty tohoto parametru u vstupních směsí formou váženého průměru hodnot CHSK jednotlivých složek budou do určité míry nepřesné, pokud se průměr bude počítat dle hmotnostních podílů složek. Pokud se parametr CHSK nahradí aditivním parametrem obsahu organických látek, stanovitelným v tuhých i tekutých substrátech (např. ztráta žíháním při 550°C), problém odpadá.

Problematiku optimalizace přípravy dávek vstupní směsi popisuje matematický model Byczanského [116], původně zamýšlený pro optimalizaci vsázky spalovny odpadů s boxovým skladem odpadů. Tento model byl přepracován pro podmínky zemědělské bioplynové stanice a uvažuje se zavedením samostatných skladů pro jednotlivé kofermentované suroviny v areálu bioplynové stanice. Schéma znázorňující sklady surovin v bioplynové stanici je uvedeno na obrázku 7.

Matematický model platný pro zařízení s boxovým uskladněním surovin (kofermentovatelných materiálů), kdy je možno z libovolného boxu (nebo jímky) odebrat libovolné množství materiálu vyžaduje dodržení následujících podmínek:

- každý druh kofermentovatelné suroviny má jeden samostatný sklad,
- je známo momentální zaplnění každého jednotlivého skladu surovinou,
- je definována kapacita každého skladu,
- jsou definovány určující vlastnosti pro hodnocení vhodnosti suroviny ke kofermentaci,
- jednotlivým určujícím vlastnostem suroviny je přiřazena váha důležitosti,
- je definovaná hmotnost (nebo objem) jednotlivé dávky vstupní směsi,
- vede se evidence o době skladování jednotlivých surovin ve skladech.

Matematický model hodnotí konkrétní parametry dávky vstupní směsi, z nichž počítá hodnotící kritérium Kr . Hodnota kritéria Kr je vypočtena pro všechny vytvořitelné kombinace jednotlivých kofermentovatelných surovin, které mohou tvořit dávku vstupní směsi. Kombinace surovin s nejvhodnější hodnotou hodnotícího kritéria je následně vyhodnocena jako optimální pro označení jako následující dávka vstupní směsi do bioreaktoru. Určení hodnotícího kritéria Kr je pracné, protože připravovaná dávka vstupní směsi se hodnotí na základě většího počtu sledovaných parametrů (obsah celkové sušiny, obsah organické sušiny, obsah celkového organického uhlíku, obsah celulózy, atd.). Cílem je, aby každá dávka vstupní směsi svými hodnocenými parametry pokud možno plynule navazovala na dávku vstupní směsi předcházející.



Obr. 7 Schématické znázornění skladu surovin v bioplynové stanici

Základem matematického modelu přípravy dávek vstupní směsi kofermentovatelných surovin je nalezení neznámých m_j , které představují hmotnosti surovin, jež je potřeba odebrat z jednotlivých skladů do dávky vstupní směsi. Neznámé m_j , musí splňovat následující podmínky:

$$0 \leq m_j \leq M_j, \quad \text{kg} \quad (5)$$

$$\sum_j m_j = q, \quad \text{kg} \quad (6)$$

$$Kr = \sum_{i=1}^{P_v} w_i \left[h_i - \frac{\sum_{j=1}^N \kappa_j m_j}{\sum_{j=1}^N m_j} \right]^2 = \text{minimální}, \quad 1 \quad (7)$$

kde M_j je hmotnost suroviny j ve skladu j , kg,
 m_j - hmotnost suroviny ve skladu j vybraná do dávky vstupní směsi, kg,
 q - požadovaná hmotnost namíchané dávky vstupní směsi, kg,
 w_i - váha materiálové veličiny i , $\text{kJ}^2 \cdot \text{kg}^2, (\text{hm.}\%)^{-2}$,
 κ_j - zastoupení veličiny i v surovině ve skladu j , $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{hm.}\%$,
 h_i - vážený průměr veličiny i v předchozí dávce vstupní směsi, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{hm.}\%$,
 P_v - počet sledovaných veličin (v našem případě $P_v = 4$), 1,
 N - počet skladů surovin (kofermentovatelných materiálů), 1.

Součet kvadrátů odchylek vážených vlastností vybírané dávky vstupní směsi má být minimální. Z podmínky (6) vyplývá, že hmotnost suroviny j v dávce vstupní směsi nemůže být nikdy větší než hmotnost dávky vstupní směsi, tedy:

$$0 \leq m_j \leq q, \quad \text{kg} \quad (8)$$

Problémem při řešení těchto podmínek je spojitost veličiny m_j . Řešení podmínek (5) až (7) spadá do oblasti matematického programování. V našem případě se jedná o úlohu nelineárního programování. Překážkou v použití tohoto matematického aparátu je lomená funkce v rovnici (7). V praxi není potřeba, abychom našli teoreticky nejlepší možné řešení. Pokusíme se docílit toho, aby byla veličina m_j diskrétní. Z toho plyne, že může nabývat pouze určitých, předem stanovených hodnot.

Hmotnost dávky vstupní směsi q rozdělíme na P stejných dílů (částí). Platí tedy:

$$q = P \cdot m_d, \quad \text{kg} \quad (9)$$

kde m_d - hmotnost jednoho dílu dávky vstupní směsi, kg,

P - počet dílů dávky vstupní směsi, 1.

Uveďme příklad. Bude – li hmotnost dávky vstupní směsi $q = 1000$ kg a zvolíme - li počet dílů $P = 10$, potom bude hmotnost jednoho dílu dávky vstupní směsi $m_d = 100$ kg. Dávka vstupní směsi může být sestavena například takto:

- 5 dílů odpadu č. 1
- 1 díl odpadu č. 2
- 3 díly odpadu č. 3
- 0 dílů odpadu č. 4
- 1 díl odpadu č. 5,

přičemž součet dílů musí být roven P a musí platit podmínky (5) až (7). Obecně můžeme říci, že čím je větší hodnota P , tím lepších výsledků je možno dosáhnout (tím můžou být rozdíly mezi následujícími dávkami skutečně čerpané vstupní směsi menší). Nyní zavedeme novou veličinu P_j , která bude charakterizovat počet dílů suroviny j v dávce vstupní směsi, přičemž platí:

$$\sum_j P_j = P, \quad 1 \quad (10)$$

$$m_j = P_j \cdot m_d, \quad \text{kg} \quad (11)$$

V této chvíli již nebudeme hledat neznámé m_j , ale jednotlivé P_j . Podmínka (7) se změní takto:

$$Kr = \sum_{i=1}^{P_v} w_i \cdot \left[h - \frac{\sum_{j=1}^N \kappa_j \cdot P_j \cdot m_d}{q} \right]^2 = \sum_{i=1}^{P_v} w_i \cdot \left[h - \frac{\sum_{j=1}^N \kappa_j \cdot P_j \cdot m_d}{P \cdot m_d} \right]^2 = \text{minimální}, 1$$

po úpravě dostaneme:

$$Kr = \sum_{i=1}^{P_v} w_i \cdot \left[h - \frac{\sum_{j=1}^N \kappa_j \cdot P_j}{P} \right]^2 = \text{minimální}, 1 \quad (12)$$

Teoreticky může veličina P_j nabývat hodnot 0 až P . Prakticky to nelze. V případě, že $P_j = P$, nemáme, co ovlivnit. Dávka vstupní směsi by byla tvořena pouze jedinou surovinou (jediným druhem kofermentovatelného materiálu) j . Proto zavedeme maximální počet dílů $P_{j,max}$, kterými může surovina j vstupovat do dávky vstupní směsi. Můžeme jej zvolit například takto:

$$P_{j,max} = P - 1, \quad 1 \quad (13)$$

Takto zajistíme, že dávka vstupní směsi bude tvořena alespoň dvěma různými surovinami.

Z podmínky (13) vyplývá, že:

$$m_{j,max} = P_{j,max} \cdot m_d, \quad \text{kg} \quad (14)$$

kde $m_{j,max}$ - maximální hmotnost suroviny j v namíchané dávce vstupní směsi, kg,

$P_{j,max}$ - maximální počet dílů, kterými může surovina j vstoupit do dávky, 1.

Může také dojít k tomu, že hmotnost suroviny ve skladu M_j bude nedostatečná (bude menší než $m_{j,max}$). Maximální počet dílů suroviny j bude:

$$P_{j,\max} = \frac{M_j}{m_d}, \quad 1 \quad (15)$$

kde M_j - hmotnost suroviny j ve skladu j , kg,

m_d - hmotnost jednoho dílu dávky vstupní směsi, kg.

Výsledek podílu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo směrem dolů.

Další problém matematického modelu spočívá v tom, že některá ze surovin by mohla ve svém skladu zůstat neúměrně dlouho, to znamená, že hodnota P_j (počet dílů v dávce vstupní směsi) této suroviny je v několika po sobě jdoucích dávkách vstupní směsi rovna 0. V takovémto případě musíme zajistit, aby se tato surovina dostala do dávky vstupní směsi alespoň v malém množství. To zajistíme zavedením další veličiny $P_{j,\min}$, která bude označovat minimální počet dílů suroviny j v dávce vstupní směsi a můžeme jej stanovit takto:

pokud

$$M_j \geq mez, \quad \text{kg} \quad (16)$$

potom

$$P_{j,\min} = 1, \quad 1 \quad (17)$$

kde mez - mezní hodnota minimální hmotnosti suroviny ve skladu, kg,

$P_{j,\min}$ - minimální počet dílů suroviny j v dávce vstupní směsi.

V případě, že je $M_j < mez$, ponecháme $P_{j,\min} = 0$. Platí tedy relace:

$$P_{j,\min} \leq P_j \leq P_{j,\max}, \quad 1 \quad (18)$$

V počítačovém programu je možno problematiku určování $P_{j,\min}$ (minimálního počtu dílů suroviny j v dávce vstupní směsi) řešit i jiným způsobem.

Uživatel programu si může na základě vlastního uvážení zvolit, které suroviny budou součástí dávky vstupní směsi. V případě, že má k dispozici například 10 skladů s deseti různými surovinami, uživatel si zvolí např. pouze 5 skladů, jejichž suroviny budou zahrnuty do počítačového výpočtu složení dávky vstupní směsi.

Vybraným surovinám se v programu automaticky přiřadí $P_{j,\min} = 1$. Tímto způsobem může obsluha programu ovlivňovat stáří surovin v jednotlivých skladech. Počet skladů surovin N v kritériu (7) se změní na počet vybraných skladů N' pro dávku vstupní směsi, který může být menší, nebo roven N .

Zavedení podmínky $P_{j,\min} = 1$ se projeví na určování $P_{j,\max}$.

$$P_{j,\max} = P - (N' - 1) \cdot P_{j,\min} = P - N' + 1, \quad 1 \quad (19)$$

kde N' - počet vybraných skladů, jejichž suroviny budou součástí dávky vstupní směsi, 1.

Z rovnice (19) vyplývá, že hodnota počtu dílů dávky vstupní směsi P nemůže být libovolné celé číslo. Bude - li $P = N'$, potom existuje pouze 1 varianta složení dávky vstupní směsi (ze všech zvolených skladů bude odebrán 1 díl suroviny o hmotnosti m_d). V tomto případě nemůžeme hovořit o optimalizaci vytváření dávek vstupní směsi kofermentovatelných surovin. V počítačovém programu může být zaveden požadavek, aby zvolené P bylo $\geq N' + 1$. V zemědělských bioplynových stanicích je počet skladů surovin (boxů či jímek) obvykle < 10 . Tady lze doporučit nastavení hodnoty počtu dílů dávky vstupní směsi P na 20 až 30 dílů.

Pro výběr vhodného složení dávky vstupní směsi budeme hledat neznámé P_j vyřešením (10), (12) a (18). To uskutečníme probíráním všech variací N -té třídy z P prvků. Počet všech variací je dán vztahem:

$$V = (P + 1)^{N'} - 1 \quad (20)$$

kde N' - počet vybraných skladů, jejichž suroviny budou součástí dávky vstupní směsi, 1,
 P - zvolený počet dílů hmotnosti dávky vstupní směsi, 1.

Tento vztah platí pouze v případě, že všechny P_j nabývají hodnot $0 - P$, pokud tomu tak není, platí vztah:

$$V = \prod_{j=1}^{N'} [P_{j,\max} - P_{j,\min} + 1], \quad 1 \quad (21)$$

Ze všech variací je zvolena ta, která dosahuje minimální hodnoty kritéria Kr .

Při vysokých hodnotách P a N' může počet variací složení dávky vstupní směsi dosahovat velmi vysokých hodnot, což se projeví na zvýšené časové náročnosti výpočtu v počítačovém programu. V provozu bioplynové stanice je sice situace například 30-ti minutového výpočtu složení dávky vstupní směsi přípustná, neboť dávkování vstupní směsi nebývá častější než jednou do hodiny, ale je účelné dobu trvání výpočtu zkrátit. Z tohoto důvodu je potřeba počet variací složení dávky zredukovat. V případě, že je například počet vybraných skladů $N' > 6$, zvolí se náhodným výběrem ($N' - 6$) skladů, kterým se automaticky přiřadí hodnota $P_{j,\max} = 1$ (při vybrání deseti surovin se náhodným čtyřem z nich určí maximální zastoupení v dávce vstupní směsi jen jedním dílem). Čas potřebný k výpočtu můžeme také ovlivnit zvoleným počtem dílů dávky vstupní směsi P . Uživateli takto pracujícího počítačového programu lze doporučit vyzkoušet výpočet složení dávky vstupní směsi pro více hodnot P a poté zvolit optimální nastavení, jelikož doba výpočtu závisí také na hardwarovém vybavení používaného PC.

8.1 *Váha důležitosti sledovaných materiálových veličin*

Matematický model optimalizace anaerobního procesu formou zrovnoměnění vsázky uvedený ve statí 8.1 sestavuje navazující dávky vstupní směsi na základě hodnocení zadaných veličin (materiálových vlastností), jejichž počet není limitován. Model umožňuje přiřadit jednotlivým hodnoceným veličinám míru důležitosti (významu) pro splnění cíle optimalizace.

Je-li pro dosažení cíle optimalizace potřeba hodnotit i konkrétních materiálových vlastností (např. obsah celkové sušiny TS, obsah organické sušiny oTS (respektive obsah organických látek OL), obsah celkového organického uhlíku TOC nebo poměr OL/TOC, obsah sacharidů + lipidů + proteinů, atd.), přiřadí se každé hodnocené vlastnosti váha w_i , která je vyjádřením priority hodnocené vlastnosti.

Stanovení konkrétní hodnoty váhy ${}_i w$ v tomto případě vyžaduje, aby veličiny různého rozměru byly převedeny na společné (porovnatelné) “ocenění“, které bude například moci nabývat hodnot od 0 do 1000. Úkolem je najít váhový koeficient (každé sledované veličiny), jehož součin s maximální hodnotou (opět každé sledované veličiny) nabývá právě maximální hodnotu ocenění (1000). Potom součin váhového koeficientu libovolné sledované veličiny s její konkrétní hodnotou bude pro konkrétní druhy surovin vždy v intervalu hodnot 0 až 1000.

Pokud vyjádříme prioritu sledované veličiny i procentuálním vyjádřením, potom hodnota váhy ${}_i w$ bude dána součinem procentuálního vyjádření priority a čtverce váhového koeficientu. Výše popsanou metodiku stanovení váhy ${}_i w$ sledované veličiny i je možné zapsat vztahem (22):

$$\frac{priorita_i}{100} \cdot \left(\frac{1000}{\max_i} \right)^2 = {}_i w \quad (22)$$

kde $priorita_i$ - procentuální vyjádření významu veličiny i , %,

1000 - koeficient maximální hodnoty ocenění, 1,

\max_i - maximální hodnota veličiny i u zvoleného souboru surovin, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, %.

Správnost tvrzení (22) je možné ověřit na následujícím příkladu: surovina j ve skladu bioplynové stanice má hmotnost 100 t, obsah celkové sušiny $TS = 11$ % hm. s vyjádřením významu 60 % a obsah celkového organického uhlíku $TOC = 0,4$ g/g_{sušiny} s vyjádřením významu 40 %. Z výrazu (23) se stanoví jádro hodnotícího kritéria Kr'_i pro obsah celkové sušiny a obsah celkového organického uhlíku v surovině takto:

$$Kr'_i = w_i \cdot \left(\kappa_j \cdot m_j \right)^2 \quad (23)$$

${}_i w$ - váha materiálové veličiny i , $(\% \text{ hm.})^{-2}$, $(\text{g/g}_{\text{sušiny}})^{-2}$

${}_i \kappa_j$ - zastoupení veličiny i v surovině ve skladu j , % hm., g/g_{sušiny},

m_j - hmotnost suroviny ve skladu j vybraná do dávky vstupní směsi, t,

$$K'_{TS} = \frac{60}{100} \cdot \left(\frac{1000}{11} \right)^2 \cdot (1 \cdot 100)^2 = 6 \cdot 10^9 \quad (24)$$

$$K'_{TOC} = \frac{40}{100} \cdot \left(\frac{1000}{0,4} \right)^2 \cdot (0,4 \cdot 100)^2 = 4 \cdot 10^9 \quad (25)$$

Vypočítané hodnoty hodnotících kritérií obou sledovaných materiálových veličin (24), (25) jsou v poměru shodném s poměrem jejich procentuálně vyjádřených důležitostí:

$$\frac{60}{40} = \frac{6 \cdot 10^{13}}{4 \cdot 10^{13}}$$

8.2 Příklad výpočtu složení dávky vstupní směsi

Pro názornost výpočtu uvažujeme pouze dva sklady se dvěma vstupními surovinami (dvěma odlišnými kofermentovatelnými materiály – viz tabulka 39) a pouze tři sledované materiálové vlastnosti. Vstupní hodnoty nastavíme následujícím způsobem:

- požadovaná hmotnost dávky vstupní směsi $m_{vs} = 100$ t,
- první hodnocená veličina (vlastnost) je obsah celkové sušiny TS , % hm., $priorita_{TS} = 80$ %,

- druhá hodnocená veličina je obsah organické sušiny oTS, % hm., $priorita_{oTS} = 10 \%$,
- třetí hodnocená veličina je poměr OL/TOC, 1, $priorita_{OL/TOC} = 10 \%$,
- počet dílů dávky vstupní směsi $P = 10$,
- materiálové vlastnosti předchozí dávky vstupní směsi: TS = 11,0 % hm., oTS = 8,0 % hm., OL/TOC = 1,75.

Tabulka č. 39: **Materiálové vlastnosti surovin ve skladech**

Označení skladu	Hmotnost M [t]	Obsah celkové sušiny TS [% hm.]	Obsah organické sušiny oTS [% hm.]	Poměr OL/TOC [-]
sklad 1	45	13	6	1,2
sklad 2	200	16	9	1,9

Nejprve musíme určit váhy veličin:

$$_{TS} w = \frac{priorita_{TS}}{100} \cdot \left(\frac{1000}{\max_{TS}} \right)^2 = \frac{80}{100} \cdot \left(\frac{1000}{16} \right)^2 = 3125, (\% \text{ hm.})^{-2}$$

$$_{oTS} w = \frac{priorita_{oTS}}{100} \cdot \left(\frac{1000}{\max_{oTS}} \right)^2 = \frac{10}{100} \cdot \left(\frac{1000}{9,0} \right)^2 = 1234,57, (\% \text{ hm.})^{-2}$$

$$_{OL/TOC} w = \frac{priorita_{OL/TOC}}{100} \cdot \left(\frac{1000}{\max_{OL/TOC}} \right)^2 = \frac{10}{100} \cdot \left(\frac{1000}{1,9} \right)^2 = 27700,83, 1$$

Dávku vstupní směsi si rozdělíme na 10 stejných dílů. Hmotnost jednoho dílu dávky je:

$$m_d = \frac{m_{vs}}{P} = \frac{100}{10} = 10 \text{ t}$$

Minimální počet dílů kterékoliv suroviny bude $P_{j,min} = 1$. Dále ve výpočtech bude platit značení:

$j = 1$ – označení suroviny ve skladu 1,

$j = 2$ – označení suroviny ve skladu 2.

Nyní je potřeba stanovit maximální počet dílů $P_{j,max}$, kterým může být surovina zastoupena v dávce vstupní směsi a maximální hmotnost $m_{j,max}$:

$$P_{j,max} = P - (N' - 1) \cdot P_{j,min} = P - N' + 1 = 10 - 2 + 1 = 9$$

$$m_{j,max} = P_{j,max} \cdot m_d = 9 \cdot 10 = 90 \text{ t}$$

Tímto jsme zjistili, že při dostatečném množství suroviny můžeme z každého skladu odebrat až 90 t odpadu do dávky vstupní směsi. Ve skladu 1 se však nachází pouze 45 t odpadu. Musíme zde použít rovnici (15):

$$P_{1,max} = \frac{M_1}{m_d} = \frac{45}{10} = 4,5 \approx 4 \quad (\text{výsledek se vždy zaokrouhluje směrem dolů na celé číslo})$$

$$m_{1,max} = P_{1,max} \cdot m_d = 4 \cdot 10 = 40 \text{ t}$$

Pro surovinu ve skladu 2 stále platí:

$$P_{2,max} = 9$$

$$m_{2,max} = 90 \text{ t}$$

Celkový počet možností složení dávky vstupní směsi je:

$$V = \prod_{j=1}^2 [P_{j,max} - P_{j,min} + 1] = (4 - 1 + 1) \cdot (9 - 1 + 1) = 36$$

Existuje tedy 36 možností, jak připravit dávku vstupní směsi, aniž bychom sledovali splnění podmínky požadované hmotnosti dávky. Jelikož musí platit, že

$$\sum_j P_j = P \rightarrow P_1 + P_2 = 10,$$

stačí řešit pouze tyto varianty poměru složek dávky:

1:9 (1 díl suroviny 1 - 9 dílů suroviny 2),

2:8 (2 díly suroviny 1 - 8 dílů suroviny 2),

3:7 (3 díly suroviny 1 - 7 dílů suroviny 2),

4:6 (4 díly suroviny 1 - 6 dílů suroviny 2).

Varianta 1:9

$$\begin{aligned} Kr_{1:9} &= \sum_{i=1}^3 w_i \left[h_i - \frac{\sum_{j=1}^2 \kappa_j \cdot P_j}{P} \right]^2 =_{TS} w_{TS} \left[h_{TS} - \frac{\sum_{j=1}^2 TS_j \cdot P_j}{P} \right]^2 +_{oTS} w_{oTS} \left[h_{oTS} - \frac{\sum_{j=1}^2 oTS_j \cdot P_j}{P} \right]^2 + \\ &+_{OL/TOC} w_{OL/TOC} \left[h_{OL/TOC} - \frac{\sum_{j=1}^2 OL/TOC_j \cdot P_j}{P} \right]^2 = 3125,0 \cdot \left[11,0 - \frac{13,0 \cdot 1 + 16,0 \cdot 9}{10} \right]^2 + \\ &+ 1234,57 \cdot \left[8,0 - \frac{6,0 \cdot 1 + 9,0 \cdot 9}{10} \right]^2 + 27700,83 \cdot \left[1,75 - \frac{1,2 \cdot 1 + 1,9 \cdot 9}{10} \right]^2 = \\ &= 3125 \cdot (11,0 - 15,7)^2 + 1234,57 \cdot (8,0 - 8,7)^2 + 27700,83 \cdot (1,75 - 1,83)^2 = \\ &Kr_{1:9} = 69031,25 + 604,94 + 177,29 = \underline{\underline{69813,48}} \end{aligned}$$

Varianta 2:8

$$\begin{aligned} Kr_{2:8} &= 3125 \cdot \left[11,0 - \frac{13,0 \cdot 2 + 16,0 \cdot 8}{10} \right]^2 + 1234,57 \cdot \left[8,0 - \frac{6,0 \cdot 2 + 9,0 \cdot 8}{10} \right]^2 + \\ &+ 27700,83 \cdot \left[1,75 - \frac{1,2 \cdot 2 + 1,9 \cdot 8}{10} \right]^2 = \\ &= 3125 \cdot (11,0 - 15,4)^2 + 1234,57 \cdot (8,0 - 8,4)^2 + 27700,83 \cdot (1,75 - 1,76)^2 = \\ &Kr_{2:8} = 60500 + 197,53 + 2,77 = \underline{\underline{60700,30}} \end{aligned}$$

Varianta 3:7

$$\begin{aligned}
Kr_{3:7} &= 3125 \cdot \left[11,0 - \frac{13,0.3 + 16,0.7}{10} \right]^2 + 1234,57 \cdot \left[8,0 - \frac{6,0.3 + 9,0.7}{10} \right]^2 + \\
&+ 27700,83 \cdot \left[1,75 - \frac{1,2.3 + 1,9.7}{10} \right]^2 = \\
&= 3125 \cdot (11 - 15,1)^2 + 1234,57 \cdot (8,0 - 8,1)^2 + 27700,83 \cdot (1,75 - 1,69)^2 = \\
Kr_{3:7} &= 52531,25 + 12,35 + 99,72 = \underline{\underline{52643,32}}
\end{aligned}$$

Varianta 4:6

$$\begin{aligned}
Kr_{4:6} &= 3125 \cdot \left[11,0 - \frac{13,0.4 + 16,0.6}{10} \right]^2 + 1234,57 \cdot \left[8,0 - \frac{6,0.4 + 9,0.6}{10} \right]^2 + \\
&+ 27700,83 \cdot \left[1,75 - \frac{1,2.4 + 1,9.6}{10} \right]^2 = \\
&= 3125 \cdot (11,0 - 14,8)^2 + 1234,57 \cdot (8,0 - 7,8)^2 + 27700,83 \cdot (1,75 - 1,62)^2 = \\
Kr_{4:6} &= 45125 + 49,38 + 468,14 = \underline{\underline{45642,52}}
\end{aligned}$$

Shrnutí výsledků těchto čtyř variant obsahuje tabulka 40.

Tabulka č. 40: **Vypočtená kritéria a vlastnosti všech variant složení dávky vstupní směsi**

Varianta mísení	Hmotnost dávky vstupní směsi [t]	Obsah celkové sušiny TS [% hm.]	Obsah organické sušiny oTS [% hm.]	Poměr OL/TOC [-]	Kr [1]
1:9	100	15,7	8,7	1,83	69813,48
2:8	100	15,4	8,4	1,76	60700,30
3:7	100	15,1	8,1	1,69	52643,32
4:6	100	14,8	7,8	1,62	45642,52
Vlastnosti předchozí dávky vstupní směsi:		11,0	8,0	1,75	

Na základě vypočtených hodnot kritérií Kr zvolíme variantu 4:6 (4 díly suroviny 1 - 6 dílů suroviny 2), neboť hodnota kritéria je nejnižší. Zvýšením počtu dílů vsázky můžeme dosáhnout lepších výsledků. Pro úplnost spočítáme, jaké hmotnosti odpadů odebereme z jednotlivých boxů:

$$m_1 = P_1 \cdot m_d = 4 \cdot 10 = 40 \text{ t}$$

$$m_2 = P_2 \cdot m_d = 6 \cdot 10 = 60 \text{ t.}$$

8.3 Počítačový program pro optimalizaci vstupní směsi

Použití počítačové techniky pro řízení mokrého anaerobního procesu formou optimalizace složení a materiálových vlastností vstupní směsi při současné kontrole několika základních procesních ukazatelů (teplota, produkce metanu, poměr CH_4/CO_2 ...) je nezbytné, neboť současné trendy v provozu bioplynových stanic, jako je rozšiřování palety zpracovávaných materiálů (odpadů) a časové zrovnoměnění dávek vstupní směsi, kladou vysoké nároky na rychlost výpočtů.

Počítačový program, jehož vývoj je v současné době připravován v rámci řešení projektu Ministerstva průmyslu a obchodu IMPULS IF-IM4/0089 „Výzkum a vývoj nových technologií kofermentace zemědělských odpadů a dalších biogenních materiálů s cílem zvýšení energetické a ekonomické efektivity procesu“ na Centru environmentálních technologií VŠB – TU Ostrava ve spolupráci s firmou Vítkovice – ENVI, a.s. [123], vychází především z potřeby hlubšího zkoumání chodu kontinuálního anaerobního procesu na laboratorním modelovém, poloprovozním i provozním bioreaktoru. V případě úspěšné verifikace výsledné formy počítačového programu bude tento moci být uplatněn v běžné praxi zemědělských bioplynových stanic.

8.3.1 Princip funkce připravovaného počítačového programu

Uživatel se po otevření počítačového programu zpřístupní databáze vlastností fermentovatelných materiálů, rozlišující materiály tekuté (čerpatelné) a materiály tuhé (ty, které je nutno vážit). Uživatel vybere z databáze suroviny, které chce anaerobně zpracovávat (které má skladem) a výběry potvrdí tlačítkem. Vybrané kofermentovatelné suroviny, které budou tvořit dávku vstupní směsi do anaerobního bioreaktoru, budou barevně odlišeny od ostatních materiálů v databázi. V případě, že uživatel bude chtít vyřadit některou položku z procesu, klikne na ni podruhé, program tuto položku vyřadí z výběru. Poté co uživatel potvrdí výběr, otevře se druhé okno programu, kde budou v horní části seřazeny vybrané suroviny, případně i s jejich materiálovými parametry. U vybraných surovin bude program indikovat případnou nutnost hygienizace (např. kuchyňské odpady) a zvýšený obsah těžkých kovů (např. kaly z ČOV). Ve spodní části okna se zobrazí políčka pro zadání objemu připravované dávky vstupní směsi a políčka pro zadání optimálních hodnot materiálových parametrů vstupní směsi, k nimž se musí počítač výpočtovým algoritmem co nejvíce přiblížit.

Optimální hodnoty budou případně moci být vybrány ze “Seznamu optimálních vsázek“, které mohou být známy z dřívější doby při určitých konkrétních procesních podmínkách dle konkrétního typu bioreaktoru. Dále bude moci uživatel zadávat jednotlivá množství vybraných surovin (v tunách nebo m^3) pro případ, že je nutné některou z nich ihned začít zpracovávat. Po stisknutí tlačítka “Vypočíst dávku“ budou všechny zadané hodnoty počítačovým programem vyhodnoceny a objeví se okno s výpisem hmotnostních podílů kosubstrátů, jejich konkrétním objemovým nebo hmotnostním množstvím, které uživatel má vpravit do míchací jímky a budou uvedeny všechny materiálové parametry virtuálně připravené dávky vstupní směsi.

V případě, že uživatel skutečně použije počítačem doporučenou dávku, potvrdí ji tlačítkem “Dávka použita“, které bude doplněno políčkem pro čas načerpání směsi do bioreaktoru. Program bude ukládat data o použitých dávkách vstupní směsi a uživateli bude přístupný tisknutelný časový záznam průběhu jednotlivých materiálových parametrů a velikostí dávek v grafické i číselné formě.

Bude-li mít uživatel k dispozici vlastní analýzy fermentovatelné suroviny, která nebyla zahrnuta do databáze programu, snadno údaje do databáze programu doplní. V případě potřeby zpřesnit data u některého již databázovaného materiálu bude mít uživatel možnost přidat tato data pouze jako nový materiál s vlastním označením.

Výhody programu by měly spočívat ve snadné ovladatelnosti a grafické jednoduchosti. Ta má za následek možnost širokého uplatnění programu napříč uživatelským spektrem, neboť zde nebudou kladeny žádné nároky na obsluhu, co se dovednosti ovládání programu týče. Program bude možno nainstalovat na libovolnou platformu (MS Windows, Linux, Mac OS).

Z předběžných průzkumů vyplývá, že program najde uplatnění spíše pro menší fermentory a ve starších bioplynových stanicích na zemědělských farmách, neboť moderní bioplynové stanice jsou budovány s již vyřešeným počítačovým zázemím, v rámci něhož je řešeno i nalezení nejvhodnější skladby vstupní směsi z dostupných surovin. Program bude rovněž sloužit při výuce v předmětech, které se zabývají problematikou anaerobních procesů. Hlavním problémem možnosti uplatnění programu u velkých zemědělských bioplynových stanic je v tom, že sortiment anaerobně zpracovávaných surovin se z krátkodobého hlediska významně nemění a tudíž provozovatel bioplynové stanice je schopen namíchat vhodnou vstupní směs dle zkušeností z předešlých období a potřeba optimalizace procesu počítačovou simulací vsázky je snížena. Pravděpodobnější uplatnění program najde naopak v případech, kde je třeba sestavovat kofermentovatelné směsi z rozmanitého sortimentu organických odpadů.

9 REALIZACE FYZIKÁLNÍHO MODELU ANAEROBNÍHO BIOREAKTORU

9.1 Modelový diskontinuální anaerobní bioreaktor o objemu 6 litrů

Pro získání základních praktických poznatků o možnostech vytvoření jednoduchého fyzikálního modelu diskontinuálního anaerobního bioreaktoru v laboratorním měřítku byla sestavena jednoduchá laboratorní aparatura, skládající ze čtyř skleněných reakčních nádob (čtyř samostatných bioreaktorů I až IV) každá o objemu 6 litrů, umístěných do společné vodní lázně, temperované na $37 \pm 2^\circ\text{C}$, viz obrázek č. 8. Proces anaerobní digesce na těchto fyzikálních modelech byl sledován po dobu 27 dnů. Každý bioreaktor byl po vložení vsázky tvořené bioodpady opatřen odvodem bioplynu do samostatného plynojemu. Pro zachování optimálních podmínek mezofilní anaerobní fermentace a jednoduchosti modelu bylo zvoleno míchání reakčních směsí pouze pomocí občasného protřepávání bioreaktorů.



Obr. 8 Modelové anaerobní bioreaktory 4 x 6 l

Po pěti dnech od začátku experimentu byly z plynojemů jednou denně (kromě víkendů) odebrány kumulativní vzorky bioplynu do skleněných vzorkovnic o objemu 500 ml. Zbytek bioplynu byl z důvodu jeho nízké produkce ponechán v plynojemu do příštího odběru. Kumulativní vzorky bioplynu byly analyzovány nejpozději následující den po odběru. Analyzován byl obsah CH_4 , CO_2 , CO , H_2 a O_2 . Složení jednotlivých vzorků bioplynu je vyjádřeno v tabulkách 6 - 9 a grafech na obrázcích 1 – 5. Vedle vznikajícího bioplynu byly taktéž analyzovány jednotlivé složky vsázky a po ukončení experimentu byly analyzovány kapalně produkty - digestáty.

Kromě těchto čtyř modelových bioreaktorů s navazující analýzou bioplynu byly sestaveny další 2 shodné bioreaktory označené V a VI. Anaerobní proces v těchto modelech byl veden paralelně k ostatním čtyřem bioreaktorům, pouze v samostatné temperované lázni při stejné teplotě a s obdobnou vsázkou (viz tabulka č. 1). Bioplyn z těchto dvou bioreaktorů nebyl z technických důvodů analyzován. Všech šest vzniklých digestátů z modelových bioreaktorů bylo podrobeno elementární analýze a rentgenové fluorescenční spektroskopii na obsah těžkých kovů a na obsah dalších prvků. Rovněž byl stanoven obsah celkové a organické sušiny a v závěru byly digestáty zhodnoceny z hlediska jejich použití jako fertilizérů na zemědělské půdě.

9.1.1 Vsázka modelových bioreaktorů

Jako inokulum tvořící cca dvě třetiny vsázky bioreaktorů I, II, IV, V a VI byl použit digestát získaný ze zemědělské bioplynové stanice na statku firmy GT92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích. Tento digestát (dále označovaný jako digestát - inokulum) pochází z mezofilní anaerobní kofermentace prasečí kejdy s masokostní moučkou, dřevními kaly a řepnými řízky. Digestát - inokulum o měrné hmotnosti 1046 kg/m^3 byl před použitím krátce uskladněn při teplotě cca 26°C . Jako substrát byla zvolena čerstvá hovězí kejda (z bioplynové stanice Pustějov), pouze v případě bioreaktoru I byla jako základní substrát použita čerstvá prasečí kejda (z bioplynové stanice Velké Albrechtice). Základní substrát byl smíchán s dvojnásobným objemem digestátu – inokula, pouze v případě bioreaktoru III byl použit základní substrát bez inokulace. Ko-substráty byly přidány v množství 100g.

Vsázku bioreaktoru I tvořila směs 2 litrů digestátu - inokula s 1 litrem prasečí kejdy. Vsázku bioreaktoru II tvořila směs 2 litrů inokula s 1 litrem hovězí kejdy a jako ko-substrát bylo přidáno 100g směsi kuchyňských odpadů, získaných z kuchyně VŠB – TU Ostrava (směs brambor, knedlíků, čočky, rýže, masa, atd.). Kuchyňské odpady byly předem upraveny pouze homogenizací bez pasterace. Vsázku bioreaktoru III tvořily 3 litry čerstvé hovězí kejdy. Vsázku bioreaktoru IV tvořila směs 2 litrů inokula s 1 litrem čerstvé hovězí kejdy a 100g kukuřičné siláže. Vsázku V tvořila směs 2 litrů inokula s 1 litrem čerstvé hovězí kejdy a 100g tuků z kuchyňských lapolů. Vsázku VI tvořila směs 2 litrů inokula s 1 litrem čerstvé hovězí kejdy a 100g řepných řízky. Složení vsázek bioreaktorů uvádí tabulka č. 1.

Tabulka č. 40: Složení vsázky v modelových bioreaktorech

Modelový bioreaktor obj. 6 l	Složení modelové vsázky
bioreaktor I	2l digestát - inokulum + 1l prasečí kejda
bioreaktor II	2l digestát - inokulum + 1l hovězí kejda + 100g kuchyňské odpady
bioreaktor III	3l hovězí kejda
bioreaktor IV	2l digestát - inokulum + 1l hovězí kejda + 100g kukuřičná siláž
bioreaktor V	2l digestát - inokulum + 1l hovězí kejda + 100g tuky z kuchyňského lapače tuků
bioreaktor VI	2l digestát - inokulum + 1l hovězí kejda + 100 g řepné řízky

Poznámka: Bioplyn z bioreaktoru V a VI nebyl z technických důvodů (omezená kapacita laboratoře plynové analýzy) analyzován.

9.1.1.1 Analytická identifikace vstupních materiálů

Za účelem získání podrobnějších informací o dílčích složkách modelové vsázky byla provedena jejich technická analýza (obsah veškeré vlhkosti a obsah popela) termogravimetricky, elementární analýza sušiny byla stanovena plynovou chromatografií. Také bylo orientačně stanoveno pH.

Stanovení obsahu celkové a organické sušiny

Obsah veškeré vlhkosti a popela byl analyzován termogravimetricky na zařízení LECO TGA – 601. Obsah celkové sušiny a organické sušiny byl zjištěn dopočtem. Obsahy celkové i organické sušiny vstupních materiálů (viz tabulka 41) odpovídají hodnotám, které lze nalézt v literatuře [2].

Tabulka č. 41: **Obsah celkové a organické sušiny ve vstupních materiálech**

Vstupní materiál	Obsah celkové sušiny [hm.%]	Obsah organické sušiny [hm.%]
prasečí kejda	5,4	3,4
hovězí kejda	8,1	6,1
kuchyňské odpady*	24,1	23,6
kukuřičná siláž	49,2	48,2
tukv z kuchyňského lapače tuků**	-	-
řepné řízky	16,75	16,61
digestát - inokulum***	8,4	4,7

Poznámka: *homogenizovaná směs brambor, knedlíků, čočky, rýže, masa, atd. **emulze použitých ztužených a kapalných tuků, olejů a vody z kuchyňského lapače tuků. ***digestát z mezofilní kofermentace prasečí kejdy s masokostní moučkou, dřevními kaly a řepnými řízky.

Elementární analýza

Pro stanovení elementárního složení vstupních materiálů byly vzorky vysušeny do konstantní hmotnosti a upraveny prosevem na automatické prosévací jednotce na zrnitost menší než 0,2 mm. Elementární analýza provedená na přístroji EURO EA – 3000, pracujícím na principu plynové chromatografie, stanovila hmotnostní procentuální obsah dusíku (N), uhlíku (C), vodíku (H), síry (S) a kyslíku (O) v jednotlivých vzorcích. Takto získané hodnoty charakterizují vzorek v bezvodém stavu. Obsah celkového chloru byl stanoven v roztoku popela vzorku jako Cl⁻ na iontovém chromatografu firmy WATERS. Všechny hodnoty byly přepočteny na původní stav vzorku (viz tabulka 42). Elementární analýza ukázala vyšší poměr C:N u prasečí kejdy než u hovězí kejdy. Poměr C:N kukuřičné siláže se nejvíce blížil prakticky ověřenému optimu 30:1 [2]. Obsah chloru je ve všech vstupních materiálech dosti nízký.

Tabulka č. 42: **Elementární složení a poměr C:N vstupních materiálů v původním stavu**

Vstupní materiál	C	H	N	S	O	Cl	Poměr C:N
	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[-]
prasečí kejda	2,0	0,3	0,2	0	1,0	0,04	11,8
hovězí kejda	2,4	0,4	0,4	0	2,9	0,08	6,7
kuchyňské odpady	5,4	1,7	0,6	0	14,8	0,31	9,0
kukuřičná siláž	22,8	3,1	0,9	0	20,2	0,06	25,3
tuky z kuchyňského lapače tuků*	-	-	-	-	-	-	-
řepné řízky	7,9	1,1	0,4	0	6,6	0	19,8
digestát - inokulum	2,5	0,3	0,4	0	1,4	0,05	6,3

Poznámka: *Elementární analýza kapalného vzorku tukové emulze z kuchyňských lapačů tuků nebyla dostupnou technikou proveditelná.

Stanovení spalitelné síry

Pro ověření obsahu spalitelné síry byly alespoň 3 vstupní materiály dodány v bezvodém stavu na analýzu do certifikované laboratoře Koksovy Mittal Steel a.s. Ostrava. Analýza byla provedena na přístroji LECO SC 432. Výsledky ukazují minimální obsah spalitelné síry jak v kejdě, tak i v kukuřičné siláži (viz tabulka 43).

Tabulka č. 43: **Obsah spalitelné síry ve vstupních materiálech v původním stavu**

Vstupní materiál	Obsah síry [hm. %]
prasečí kejda	0,03
hovězí kejda	0,04
kukuřičná siláž	0,06

Poznámka: Hodnota je aritmetickým průměrem tří výsledků.

Stanovení pH

Orientačně bylo stanoveno pH vzorků prasečí a hovězí kejdy, digestátu - inokula, řepných řízků a vodního výluhu kukuřičné siláže univerzálním indikátorovým papírkem. Vesměs se jedná o mírně zásadité materiály, pouze kukuřičná siláž je dosti kyselá a digestát je podle očekávání nejzásaditější (viz tabulka 44).

Tabulka č. 44: pH vstupních materiálů

Vstupní materiál	pH
prasečí kejda	8,0
hovězí kejda	8,0
kukuřičná siláž	3,5
řepné řízky	7,0
digestát - inokulum	8,5

Poznámka: Hodnocen byl vodní výluh kukuřičné siláže.

9.1.2 Výstupní produkty modelové kofermentace

9.1.2.1 Produkce a složení bioplynu

Produkcí bioplynu z jednotlivých bioreaktorů nebylo možno vzhledem k objemu použitých plynojemů přesně sledovat. Odhadem nejvyšší produkce bioplynu byla z prasečí kejdy (bioreaktor I) a hovězí kejdy s přidavkem kuchyňských odpadů (bioreaktor II), denně cca 1 až 2-násobek objemu reakční směsi (tj. 6 až 12 l). Nižší produkce bioplynu byla u bioreaktoru IV (kukuřičná siláž podléhá anaerobnímu rozkladu obtížněji než kuchyňské odpady) a nejnižší produkce bioplynu byla z čisté hovězí kejdy (bioreaktor III). Čistá hovězí kejda, ač doporučovaná pro zapracování nových bioreaktorů (ústní sdělení Ing. Kamila Drobného z Vítkovice ENVI a.s.), zjevně neobsahovala dostatek metanogenů a anaerobní proces probíhal s velmi nízkým výtěžkem bioplynu.

Základní složky bioplynu byly analyzovány na následujících zařízeních: **CH₄**: infračervený analyzátor UNOR CH₄ (MAIHAK), **CO₂**: infračervený analyzátor UNOR CO₂ (MAIHAK), **CO**: absorpční analyzátor Ultraz 4, **H₂**: plynový chromatograf DANI 1000 DPC, **O₂**: magnetodynamický analyzátor SERVOMEX OA 570 A. Výsledky analýz jednotlivých kumulativních vzorků bioplynu jsou uvedeny v tabulkách 45 - 48 a na obrázcích 9 - 13.

Odběr bioplynu z plynojemů nebo čerpání bioplynu do analyzátorů se pravděpodobně neobešly bez částečného zavzdušnění, proto obsah kyslíku ve vzorcích bioplynu kolísá mezi 5 a 15 obj. % (viz tabulky 45 - 48). Běžný obsah metanu ve vzorcích z bioreaktoru I byl 60 až 70 obj. %. U bioreaktoru II obsah metanu na 55 až 65 obj. % narostl pozvolna. Obsah metanu v bioplynu z bioreaktoru III byl velmi nízký (maximálně 27 obj. %). Bioreaktor IV produkoval bioplyn s obsahem metanu stabilně cca 55 obj. %. Obsah oxidu uhličitého byl podle očekávání nejvyšší ve vzorcích s nejnižším obsahem metanu. Především u bioreaktoru III s čistou hovězí kejdou dosahoval obsah CO₂ 40 až 50 obj. %. Obsah oxidu uhelnatého byl u všech vzorků zanedbatelný (méně než 1 obj. %). Obsah vodíku v žádném vzorku bioplynu významně nepřekročil hodnotu 250 ppm. Grafy složení vzorků bioplynů, odebíraných denně (od šestého dne kofermentace) jsou uvedeny na obrázcích 9 - 12.

Tabulka č. 45: Složení bioplynu z bioreaktoru I (2 l digestát - inokulum + 1 l prasečí kejda)

Den odběru bioplynu	CH ₄	CO ₂	CO	H ₂	O ₂
	[obj. %]	[obj. %]	[obj. %]	[ppm]	[obj. %]
1	-	-	-	-	-
2	58	5,1	0,87	0	11,1
3	62,5	19,6	0,02	0	8,6
4	72,5	19,6	0,02	0	5,8
5	62,4	17,4	0,02	0	8,8
6	69,8	19,2	0,02	0	5,4
7	57,2	20,0	0,08	0	9,8
8	67,5	20,0	0,02	0	7,1
9	59,8	20,8	0,01	-	11,1
10	67,3	16,6	0,01	-	7,9
11	60,0	17,8	0,03	-	9,4
12	68,6	17,4	0,01	-	5,5
13	62,5	13,8	0,08	-	9,2
14	65,1	17,4	0,07	-	7,3
15	50,1	11,6	0,06	-	12,7
Průměrný obsah složky	63,1	16,9	0,09	0	8,6

Poznámka: neměřeno -

Tabulka č. 46: Složení bioplynu z bioreaktoru II (2 l digestát inokulum + 2 l hovězí kejda + 100 g kuchyňské odpady)

Den odběru bioplynu	CH ₄	CO ₂	CO	H ₂	O ₂
	[obj. %]	[obj. %]	[obj. %]	[ppm]	[obj. %]
1	11,6	39,2	-	108	15,5
2	21,9	18,8	0,01	157	13,2
3	22,6	31,2	0,1	142	12,1
4	18,2	25,6	0,77	74	13,8
5	54,8	27,6	0,52	88	5,5
6	-	-	-	-	-
7	56,0	23,6	0,06	126	6,4
8	57,8	24,4	0,08	262	6,5
9	61,3	24,8	0,26	-	5
10	57,2	23,2	0,1	-	6,2
11	62,5	23,2	0,39	-	6,9
12	64,8	20,8	0,2	-	5,7
13	65,2	22,0	0,76	-	5,4
14	64,9	20,8	0,28	-	6,2
15	66,2	20,8	0,62	-	5,6
Průměrný obsah složky	43,8	25,6	0,33	154	9

Poznámka: neměřeno –

Tabulka č. 47: Složení bioplynu z bioreaktoru III (3 l hovězí kejda)

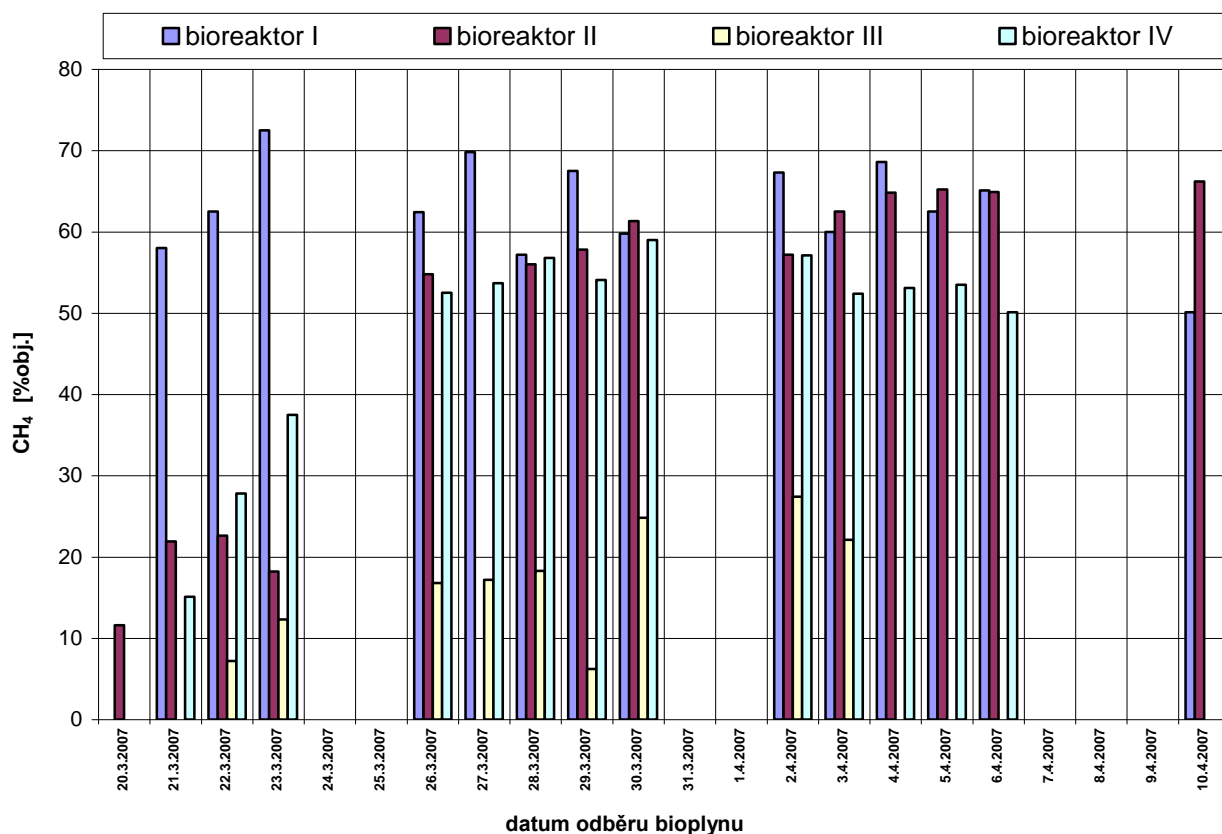
Den odběru bioplynu	CH ₄	CO ₂	CO	H ₂	O ₂
	[obj. %]	[obj. %]	[obj. %]	[ppm]	[obj. %]
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	7,2	17,9	0,09	186	10
4	12,3	28,8	0,32	206	8,5
5	16,8	42,0	0,04	256	9
6	17,2	49,2	0,04	172	8,8
7	18,3	47,2	0,05	199	7,2
8	6,2	48,8	0,03	234	11,6
9	24,8	37,6	0,04	-	8,4
10	27,4	31,2	0,26	-	11
11	22,1	19,6	0,59	-	14,3
12	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-
Průměrný obsah složky	16,9	35,8	0,16	209	9,9

Poznámka: neměřeno -

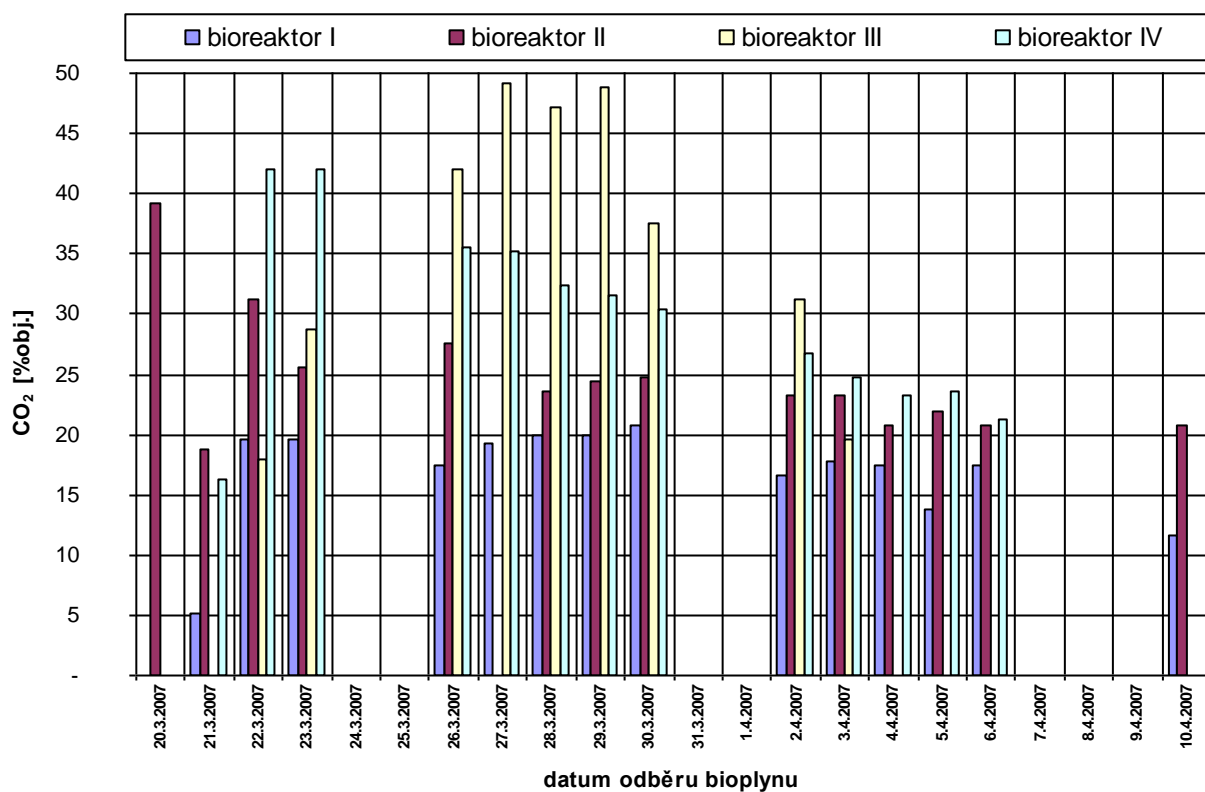
Tabulka č. 48: Složení bioplynu z bioreaktoru IV (2 l digestát inokulum + 1 l hovězí kejda + 100 g kukuřičná siláž)

Den odběru bioplynu	CH ₄	CO ₂	CO	H ₂	O ₂
	[obj. %]	[obj. %]	[obj. %]	[ppm]	[obj. %]
1	-	-	-	-	-
2	15,1	16,2	0	111	15,8
3	27,8	42,0	0,32	284	10,1
4	37,5	42,0	0,01	248	7,8
5	52,5	35,6	0,04	125	6,8
6	53,7	35,2	0,38	226	6,6
7	56,8	32,4	0,58	85	6,3
8	54,1	31,6	0,13	0	9
9	59,0	30,4	0,18	-	5,6
10	57,1	26,8	0,08	-	8,2
11	52,4	24,8	0,07	-	9,6
12	53,1	23,2	0,06	-	8,7
13	53,5	23,6	0,06	-	7,9
14	50,1	21,2	0,06	-	11,3
15	-	-	-	-	-
Průměrný obsah složky	47,9	29,6	0,15	154	8,7

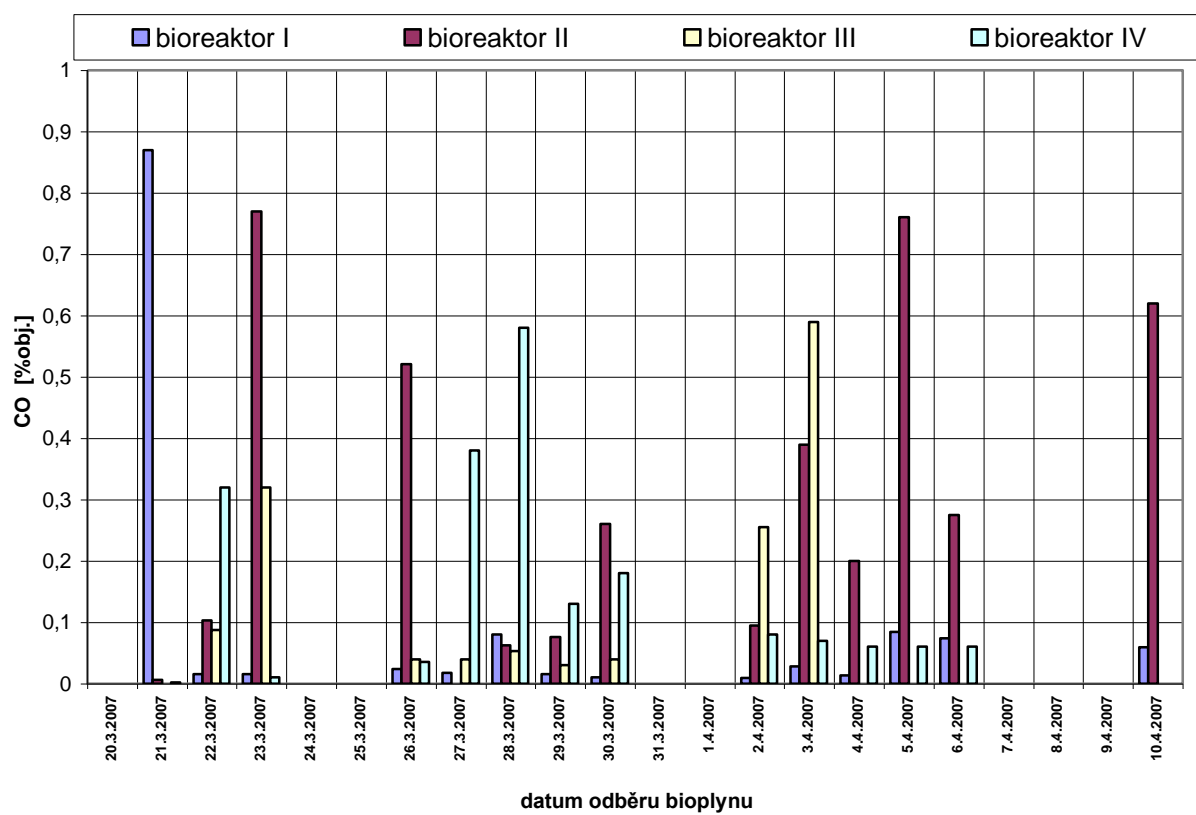
Poznámka: neměřeno -



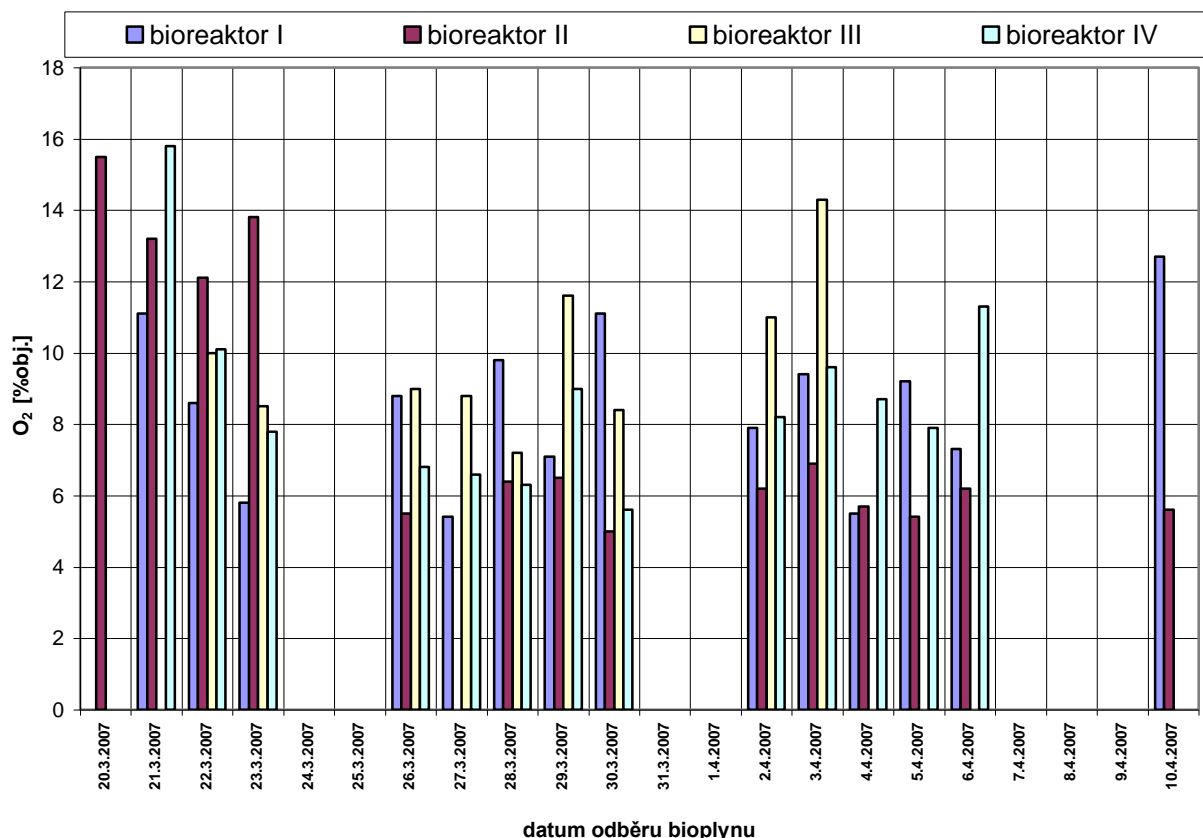
Obr. 9 Obsah metanu v bioplynu



Obr. 10 Obsah oxidu uhličitého v bioplynu



Obr. 11 Obsah oxidu uhelnatého v bioplynu

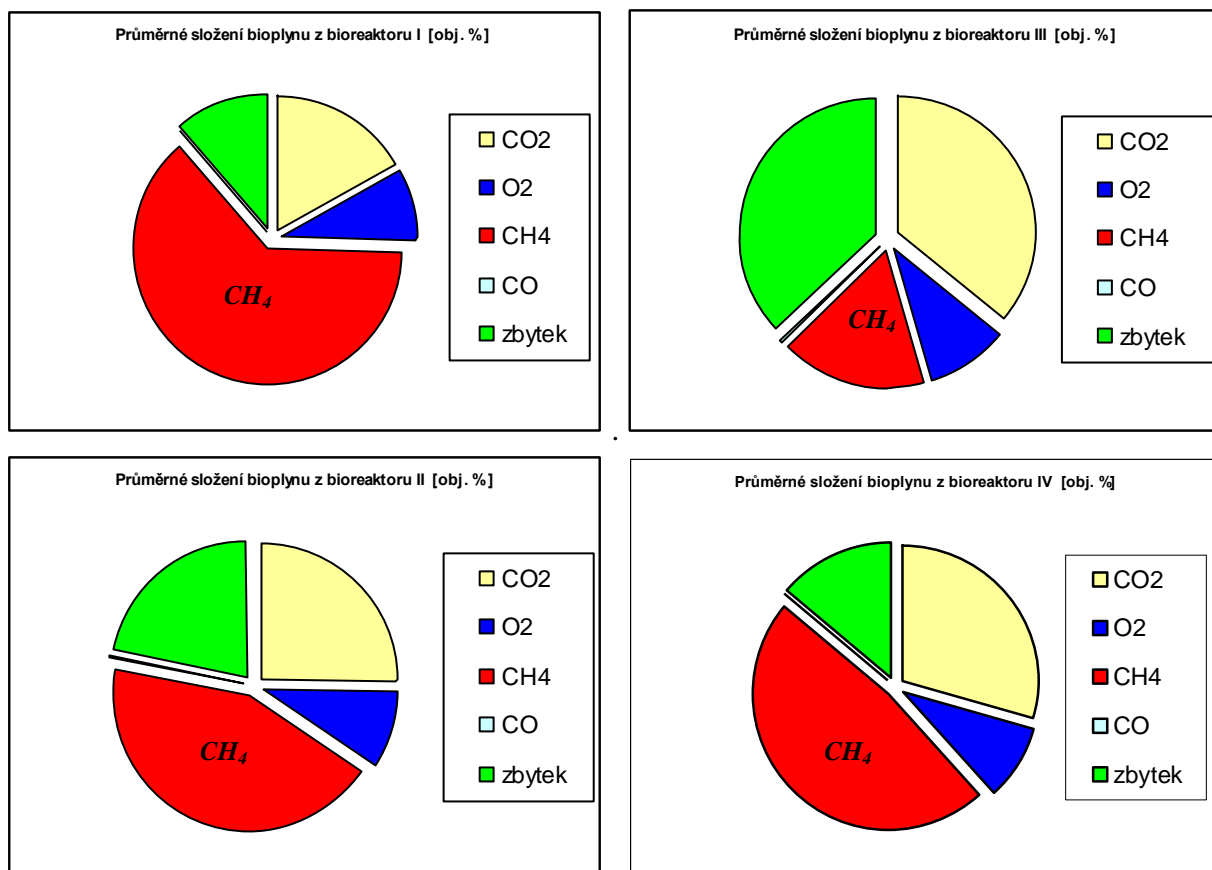


Obr. 12 Obsah kyslíku v bioplynu

Bioplyn z bioreaktoru I

(2 l digestát - inokulum + 1 l prasečí kejda)

Průměrný obsah metanu v bioplynu z tohoto bioreaktoru byl nejvyšší (63 obj. %), což je v souladu s mnoha literárními odkazy o fermentaci prasečí kejdy [4,5,6]. Obsah CO_2 se pohyboval kolem 17 obj. %. Obsah O_2 byl okolo 8,6 obj. %, což mohlo být způsobeno nezaznamenaným průnikem vzduchu do vzorkovnice. Tomu nasvědčuje i shodnost průměrného obsahu kyslíku ve všech čtyřech bioreaktorech během celého měření (přibližně 9 obj. %). Obsah CO byl zanedbatelný okolo 0,1 obj. % a obsah H_2 v tomto bioreaktoru byl na hranici detekovatelnosti; následně od jeho měření bylo upuštěno. Ze srovnání provedených analýz vzorků bioplynu s literárními prameny [8] je patrné, že tento bioreaktor I má ze všech zkoumaných bioreaktorů nejvhodnější složení vsázky, poskytující vysokou produkci bioplynu s nejvyšším naměřeným obsahem metanu. Průměrné složení bioplynů je uvedeno v tabulce 49.



Obr. 13 Průměrné složení bioplynu z bioreaktorů I, II, III a IV

Bioplyn z bioreaktoru II

(2 l digestát – inokulum + 1 l hovězí kejda + 100 g kuchyňské odpady)

Obsah metanu v bioplynu z tohoto bioreaktoru byl znatelně nižší než v případě bioreaktoru I (průměrně jen 44 obj. %), naopak obsah CO₂ byl vyšší téměř o 10 obj. % (činil 26 obj. %). Toto mohlo být způsobeno například vyšším obsahem mastných kyselin díky přidavku kuchyňských odpadů. Obsah O₂ v tomto případě činil průměrně 9 obj. %; jak již bylo zmíněno výše, mohl být způsoben netěsnostmi při odběru bioplynu apod. Obsah CO je taktéž zanedbatelný (okolo 0,3 obj. % jako v předchozím případě). Průměrný obsah H₂ v tomto bioreaktoru byl velmi nízký (cca 150 ppm). Ve srovnání s bioreaktorem I poskytovala vsázka bioreaktoru II pravděpodobně o málo vyšší produkci bioplynu, ale nižší obsah metanu naznačoval menší vhodnost vsázky.

Bioplyn z bioreaktoru III

(3 l hovězí kejda)

Průměrný obsah metanu byl v tomto bioplynu nejnižší ze všech čtyř sledovaných bioplynů a to pouze 17 obj. %; uvedené mohlo být způsobeno nedostatkem metanogenních bakterií apod. V bioreaktoru nebylo přítomno žádné inokulum, které by pomohlo iniciovat všechny fáze anaerobního procesu. Je tedy patrné, že při použití čerstvé hovězí kejdy (bez kosubstrátů) tato nemá dost vhodných mikroorganismů pro průběh anaerobní digesce. Obsah CO₂ v bioplynu z tohoto bioreaktoru byl nejvyšší (průměrně 36 obj. %). Obsah CO činil 0,2 obj. %. Naproti tomu obsah H₂ byl nejvyšší právě u tohoto reaktoru III, jeho průměrná hodnota činila cca 200 ppm.

Toto vše naznačuje nedokonalou návaznost dílčích fází anaerobního procesu nebo potlačení fáze metanogeneze. V literatuře [7] se uvádí hovězí kejda jako optimální materiál pro zapracování nových bioreaktorů, jelikož střeva přežvýkavců obsahují nejvyšší podíl metanogenních mikroorganismů. Samotný proces tvorby bioplynu v bioreaktoru III skončil brzy (do cca 15-ti dnů) a bioplyn především obsahoval balastní oxid uhličitý. Je patrné, že vsázka tvořená pouze hovězí kejdou bez inokulace nebyla vhodná pro produkci bioplynu. Vhodně zvolený kosubstrát obsahující další mikroorganismy mohl přispět ke zlepšení procesu fermentace hovězí kejdy, což se ve skutečných bioplynových stanicích děje například mísením kejdy hovězí s kejdou prasečí [7].

Bioplyn z bioreaktoru IV

(2 l digestát - inokulum + 1 l hovězí kejda + 100 g kukuřičná siláž)

Průměrný obsah metanu v bioplynu z tohoto bioreaktoru byl nízký (48 obj. %) a téměř se shodoval s průměrným obsahem metanu z bioreaktoru II. Příčinou mohlo být nižší pH směsi nebo přetížení reakčního prostoru nadměrným přídatkem kosubstrátu (přídavek kuchyňských odpadů či kukuřičné siláže měl podobný efekt). Průměrný obsah CO₂ byl 30 obj. %. Průměrný obsah O₂ činil 8,5 obj. %. Průměrný obsah CO byl cca 0,2 obj. %. Obsah H₂ v tomto bioreaktoru byl opět zanedbatelný (cca 150 ppm).

Tabulka č. 49: **Průměrné hodnoty složení bioplynu v jednotlivých bioreaktorech**

Průměrné složení bioplynu	CH ₄	CO ₂	CO	O ₂	H ₂	Zbytek
	[obj.%]	[obj.%]	[obj.%]	[obj.%]	[obj.%]	[obj.%]
bioreaktor I	63,1	16,9	0,1	8,6	0	11,4
bioreaktor II	43,8	25,6	0,3	9,0	0	21,6
bioreaktor III	16,9	35,8	0,2	9,9	0	37,4
bioreaktor IV	47,9	29,6	0,2	8,7	0	13,8

Lze konstatovat, že vsázka bioreaktoru I (digestát – inokulum a prasečí kejda) je při poměru 2:1 nejvhodnější ze všech čtyř zkoumaných vsázek pro získání energeticky bohatého bioplynu ve velkém množství. Vsázku tvořenou základním substrátem - hovězí kejdou s přídavkem kuchyňských odpadů (bioreaktor II) či kukuřičné siláže (bioreaktor IV) je rovněž možno považovat za hodnotnou, ale optimální poměry složek je potřeba blíže stanovit. Pokud budou u takovéto vsázky nalezeny správné hmotnostní podíly, je možné očekávat nejen vysokou produkci bioplynu, ale i relativně vysoký obsah metanu. Samotná hovězí kejda bez použití digestátu - inokula není vhodná pro tvorbu vysoce výhřevného bioplynu. Tato vsázka produkovala bioplyn kratší dobu a obsah metanu byl průměrně pouhých 17 obj. %. Od přídavku tukových odpadů (bioreaktor V) lze teoreticky očekávat vysokou produkci bioplynu (při velmi omezeném přídavku tuků). Tuky způsobují přetížení bioreaktoru a velmi zvyšují viskozitu směsi. Směs hovězí kejdy s řepnými řízky (bioreaktor VI) je po stránce plynodajnosti obdobná směsí s kukuřicí. Složení bioplynů z bioreaktorů V a VI nebylo z důvodů omezené kapacity laboratoře plynové analýzy možné stanovit. Rovněž analyzátory sulfanu a amoniaku nebylo možné zajistit, proto se omezují pouze na konstatování zápachu bioplynu po sulfanu.

9.1.2.2 Analytická identifikace digestátů

Obsah rizikových látek a prvků

Vzorky připravených digestátů z bioreaktorů I až VI byly po vysušení při 105°C podrobeny analýze na disperzním rentgenovém fluorescenčním spektrometru SPECTRO X pro zjištění hodnot rizikových látek (6 kongenerů PCB) a prvků (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn). Tyto parametry digestátů získaných v modelových bioreaktorech I až VI byly porovnány s hodnotami kapalného digestátu - inokula, získaného z bioplynové stanice ve Velkých Albrechticích (mokrá mezofilní fermentace) a rovněž s hodnotami fermentovaného slamnatého hovězího hnoje z bioplynové stanice v Jindřichově (suchá mezofilní fermentace). Hodnoty všech výše zmíněných materiálů byly porovnány s mezními hodnotami vybraných rizikových látek a prvků, danými vyhláškou Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb., ve znění vyhlášky č. 504/2004 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, příloha č. 3 (vybrané rizikové látky a prvky v kalech) [108]. Porovnáním bylo možno posoudit jejich vhodnost pro použití jako fertilizérů na zemědělské půdě (viz tabulka 10). Bylo zjištěno, že získané digestáty je možné označit za vyhovující k aplikaci na zemědělské půdě. Výjimku tvoří digestáty z čisté hovězí kejdy (bioreaktor III) a ze směsi hovězí kejdy s kukuřičnou siláží (bioreaktor IV). Tyto dva digestáty měly překročen obsah mědi, přičemž u digestátu z hovězí kejdy byl obsah mědi překročen dvojnásobně a u digestátu ze směsi s kukuřičnou siláží byl překročen pouze nepatrně.

Tabulka č. 50: Porovnání naměřených a vyhláškou [108] stanovených mezních hodnot vybraných rizikových látek a prvků v digestátu

Ukazatel	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	PCB
Limitní hodnota	30	5	200	500	4	100	200	2500	0,6
Naměřená hodnota [mg/kg sušiny]									
digestát - inokulum	1,5	1,6	7,8	79	<3	14,4	11,6	620	<0,001
fermentovaný slamnatý hovězí hnůj	1,5	0,6	4,2	104	<2	9,2	8,0	700	<0,001
digestát z bioreaktoru I	<1,3	1,8	5,8	109	<2	14,0	13,4	716	0,02
digestát z bioreaktoru II	<1,3	1,4	5,7	438	<2	15,4	12,6	646	0,01
digestát z bioreaktoru III	1,5	0,4	7,0	1140	<2	9,4	6,0	447	0,01
digestát z bioreaktoru IV	<1,3	1,1	5,3	508	<2	12,9	11,0	650	0,02
digestát z bioreaktoru V	<1,3	0,7	8,5	354	<2	10,2	7,6	487	<0,01
digestát z bioreaktoru VI	1,5	1,5	8,5	353	<2	13,2	10,6	616	<0,01
Posouzení splnění limitních hodnot	vyhovují	vyhovují	vyhovují	Nevhovují	vyhovují	vyhovují	vyhovují	vyhovují	vyhovují

Poznámka: Mezní hodnoty dle vyhlášky MZe č. 382/2001 Sb. ve znění vyhlášky 504/2004 Sb., o podmínkách použití kalů na zemědělské půdě, přílohy č. 3. Nejistota stanovení nepřesahuje 20 %. Obsah AOX podle vyhlášky 382/2001 Sb. nebyl stanoven.

Dále byly v sušině všech digestátů stanoveny některé další minoritní prvky v oxidické formě pomocí rentgenové fluorescenční spektroskopie. Významněji je v digestátech zastoupen pouze fosfor a vápník, méně pak hořčík, křemík a draslík (viz tabulka 51).

Tabulka č. 51: Stanovení v oxidické formě základních prvků v digestátech

Digestát	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₃	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]
digestát - inokulum	<2	2,2	<0,2	2,23	13,2	1,8	1,1	2,2	16	0,03	0,1	0,5
fermentovaný slamnatý hovězí hnůj	<1	1,45	0,2	7,1	3,2	1,9	0,3	2,2	3,7	0,1	0,1	0,1
digestát z bioreaktoru I	1,7	2,2	<0,2	2,4	12	1,8	1,3	2,9	15	0,03	0,1	0,5
digestát z bioreaktoru II	2,6	2,3	<0,2	2,7	10,5	1,7	1,4	3,2	14,2	0,1	0,1	0,5
digestát z bioreaktoru III	<1	1,8	<0,2	3,8	2,4	1,6	1,1	4,2	4,8	0,03	0,04	0,3
digestát z bioreaktoru IV	<1	2,6	<0,2	2,9	11	1,6	1,1	2,9	13	0,03	0,1	0,5
digestát z bioreaktoru V	<1	1,3	<0,2	2,1	6,8	1,4	0,9	2,3	9,2	0,03	0,04	0,3
digestát z bioreaktoru VI	<1	2,3	<0,2	2,8	12,2	1,9	1,2	2,7	14,2	0,03	0,05	0,5

Poznámka: Analyzovány byly vzorky vysušené při 105 °C.

Obsah celkové a organické sušiny digestátů

Ve vzorcích digestátů byl termogravimetricky stanoven obsah veškeré vlhkosti a obsah popela. Obsah celkové sušiny a obsah organické sušiny byly zjištěny dopočtem. Připravené digestáty měly obsah celkové sušiny cca 7 až 8 % hm., z toho cca 4 až 5 % hm. organické sušiny. Výjimku tvoří digestát směsi s tuky z lapače tuků (celková sušina 11 % hm., organická sušina 8 % hm.) a suchou metodou fermentovaný slamnatý hovězí hnůj (19 % hm. celkové sušiny a 15 % hm. organické sušiny). Obsahy sušiny jsou uvedeny v tabulce 52.

Tabulka č. 52: Obsah celkové a organické sušiny digestátů

Digestát	Obsah celkové sušiny [% hm.]	Obsah organické sušiny [% hm.]
digestát - inokulum	8,4	4,7
fermentovaný slamnatý hovězí hnůj	19,0	14,8
digestát z bioreaktoru I	6,9	3,9
digestát z bioreaktoru II	7,4	4,1
digestát z bioreaktoru III	6,9	5,4
digestát z bioreaktoru IV	8,0	4,8
digestát z bioreaktoru V	11,2	8,1
digestát z bioreaktoru VI	8,5	4,6

Elementární analýza digestátů

Pro stanovení elementárního složení byly vzorky digestátů vysušeny do konstantní hmotnosti a upraveny prosevem na automatické prosévací jednotce na zrnitost menší než 0,2 mm. Elementární analýza provedená na přístroji EURO EA – 3000 stanovila hmotnostní procentuální obsah dusíku (N), uhlíku (C), vodíku (H), síry (S) a kyslíku (O) v jednotlivých vzorcích. Hodnoty byly přepočteny na původní stav vzorku (viz tabulka 53). Digestáty obsahují 2 – 3 hm.% organického uhlíku, pouze fermentovaný hovězí slamnatý hnůj obsahuje 8 hm.% organického uhlíku. Rovněž obsah kyslíku je u fermentovaného hnoje výrazně vyšší. Digestáty z bioreaktoru III (hovězí kejda) a bioreaktoru V (hovězí kejda s tuky z lapolů) mají optimální poměr C:N pro případný druhý stupeň digesce. Obsah spalitelné síry je zanedbatelný a rovněž obsah síry v oxidické formě, stanovený rentgenovou fluorescenční spektrometrií (viz tab. č. 51), je nízký (typicky cca 1,7 hm.%). Elementární analýza potvrdila pokles obsahu uhlíku i dusíku u

digestátu na cca 10 % hodnoty vstupní kejdy. Optimální poměr C:N digestátů, který je důležitý pro případný druhý stupeň anaerobní digesce, byl zjištěn u vzorků z bioreaktorů III (16,5) a V (17,8).

Tabulka č. 53: Elementární analýza a poměr C:N digestátů v původním stavu

Digestát	C	H	N	S	O	Poměr C:N
	[% hm.]	[% hm.]	[% hm.]	[% hm.]	[% hm.]	[-]
digestát - inokulum	2,5	0,3	0,4	0,0	1,4	6,3
fermentovaný slamnatý hovězí hnůj	8,1	1,0	0,6	0,0	5,1	13,5
digestát z bioreaktoru I	2,1	0,3	0,3	0,0	1,2	7,1
digestát z bioreaktoru II	2,3	0,3	0,3	0,0	1,2	7,8
digestát z bioreaktoru III	3,0	0,4	0,2	0,0	1,8	16,5*
digestát z bioreaktoru IV	2,8	0,3	0,3	0,0	1,4	8,9
digestát z bioreaktoru V	5,5	0,8	0,3	0,0	1,5	17,8*
digestát z bioreaktoru VI	2,8	0,4	0,3	0,0	1,1	8,8

Spalné teplo a výhřevnost sušiny digestátů

Spalné teplo sušiny digestátů bylo zjištěno kalorimetricky dle ČSN ISO 1928 na přístroji LECO AC – 350. Výhřevnost byla vypočtena dle vzorce pro výpočet výhřevnosti při konstantním tlaku dle normy ČSN ISO 1928 (na základě laboratorně stanovených hodnot spalných tepel a obsahu vodíku, kyslíku, dusíku a vlhkosti). Spalné teplo digestátu z prasečí kejdy (bioreaktor I), má hodnotu pouze cca 11 500 kJ/kg. Spalné teplo sušin digestátů z hovězího materiálu (fermentovaný slamnatý hovězí hnůj nebo hovězí kejda z bioreaktoru III) je významně vyšší 16 900 respektive 16 500 kJ/kg. Oproti tomu spalné teplo sušin digestátů z kofermentace hovězí kejdy s kuchyňskými odpady (bioreaktor II), kukuřičnou siláží (bioreaktor IV) nebo řepnými řízky (bioreaktor VI) nepřekračuje příliš hodnotu 12 000 kJ/kg. Spalné teplo digestátu z kofermentace hovězí kejdy s tuky z kuchyňského lapače tuků je dle očekávání nejvyšší (cca 22 500 kJ/kg). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 54.

Tabulka č. 54: Spalné teplo a výhřevnost celkové sušiny digestátů

Digestát	Spalné teplo	Výhřevnost
	[kJ/kg]	[kJ/kg]
digestát - inokulum	11 480	8 400
fermentovaný slamnatý hovězí hnůj	16 900	13 300
digestát z bioreaktoru I	11 580	8 480
digestát z bioreaktoru II	12 030	8 940
digestát z bioreaktoru III	16 500	13 120
digestát z bioreaktoru IV	12 820	9 660
digestát z bioreaktoru V	22 540	18 900
digestát z bioreaktoru VI	12 300	9 190

Poznámka: Vzorky byly vysušeny při 105°C.

pH digestátů

Orientačně bylo stanoveno pH vzorků digestátů univerzálním indikátorovým papírkem. Všechny digestáty mají mírně zásaditý charakter, pouze digestát ze směsi obsahující tukovou emulzi z kuchyňských lapačů tuků je přibližně neutrální (viz tabulka 55).

Tabulka č. 55: pH digestátů

Digestát	pH
digestát - inokulum	8,5
fermentovaný slámnatý hovězí hnůj	8,0
digestát z bioreaktoru I	8,5
digestát z bioreaktoru II	8,5
digestát z bioreaktoru III	8,5
digestát z bioreaktoru IV	8,5
digestát z bioreaktoru V	7,0
digestát z bioreaktoru VI	8,5

Vzhled a zápach digestátů

Kuchyňské odpady a řepné řízky byly anaerobní kofermentací rozloženy do té míry, že nebyly v rezultujícím digestátu patrné. Po kukuřičné siláži zbyly evidentně anaerobním procesem nedotčené zbytky kukuřičného zrna. Dřevnaté stonky přítomné v hovězí kejdě prošly anaerobním procesem bez viditelné změny. Na rozdíl od všech ostatních digestátů měl digestát z kofermentace tuků z lapolů (modelový bioreaktor V) velmi vysokou viskozitu, a proto se nesnadno vysoušel. Tento digestát měl výrazně světlejší barvu a jeho sušina byla hůře dezintegrovatelná. Intenzivní zápach, patrný u všech vzorků digestátů, byl způsoben stále vysokým obsahem organické hmoty, pravděpodobně značným obsahem mastných kyselin (meziprodukty anaerobního rozkladu) a především uvolňujícím se amoniakem i sulfanem. Zápach z tuků z kuchyňských lapolů byl zřetelný i po proběhnutí kofermentace.

Zhodnocení zbytkové plynodajnosti digestátu

Pro získání základní představy o zbytkové plynodajnosti a složení bioplynu z typického digestátu ze zemědělské bioplynové stanice, který byl již několik měsíců uskladněn ve skladovací jímce, byl využit jeden z výše uvedených modelových bioreaktorů o objemu 6 litrů. Rovněž ostatní části použité modelové aparatury odpovídají popisu uvedenému v odstavci 9.1. Analyzován byl vzorek digestátu získaný z bioplynové stanice firmy GT92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích, odebraný z výstupního potrubí bioreaktorů dne 13.3.2007. Jedná se o digestát z anaerobní kofermentace prasečí kejdy s masokostní moučkou, dřevními kaly (zásadité kaly z celulózky) a řepnými řízky (v předchozích statích označen jako digestát – inokulum). Digestát o měrné hmotnosti 1046 kg/m^3 byl uskladněn po dobu čtyř měsíců při laboratorní teplotě a následně vložen v množství 5 litrů do modelového laboratorního bioreaktoru. Bioplyn byl jímán do plynojemu a kumulativní vzorky bioplynu byly analyzovány na plynovém chromatografu Orsat.

Z výsledků analýz kumulativních vzorků bioplynu vyplývá, že i digestát čtyři měsíce ponechaný při teplotě laboratoře 18 až 26 °C je schopen uvolňovat malé množství bioplynu. Denní produkce bioplynu činila přibližně 0,1 až 0,2 l/l digestátu. Bioplyn z tohoto starého digestátu obsahoval cca 60 % obj. metanu, 13 % obj. oxidu uhličitého a cca 4 % obj. vodíku. Obsah nenasyčených uhlovodíků a oxidu uhelnatého byl na hranici detekce. Složení bioplynu je uvedeno v tabulce 56.

Nepoužitý zbytek digestátu – inokula byl ponechán při laboratorní teplotě celkem 5 měsíců, a dne 13.8.2007 byl v množství 5 litrů vložen do modelového laboratorního bioreaktoru o objemu 6 litrů. Jako kosubstrát bylo přidáno 200g masokostní moučky 3. kategorie. Fermentační teplota byla nastavena na 40 °C. Během necelých dvaceti hodin došlo k intenzivnímu napěnění reakční směsi, což mělo za následek zneprůchodnění plynové trasy a roztržení bioreaktoru. Použitý digestát i přes dlouhou dobu uskladnění obsahoval živé kultury mikroorganismů. Potvrdil se rychlý náběh digesce masokostní moučky. Silný vývin bioplynu byl zjištěn i u směsi 200g masokostní moučky s 5 litry digestátu – inokula, který byl již předtím při teplotě cca 40 °C fermentován dvakrát.

Tabulka č. 56: Složení bioplynu ze staršího vzorku digestátu

Složka bioplynu	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂	CO	C _n H _m
Obsah složky [% obj.]	59,4	13,4	18,7	4,6	3,7	0,0	0,2

Poznámka: Hodnoty jsou aritmetický průměr pěti měření, C_nH_m je obsah nenasycených uhlovodíků.

9.1.3 Zhodnocení výsledků práce na modelových bioreaktorech objemu 6 litrů

Jednalo se o sérii úvodních experimentů, jež měly za úkol poskytnout základní poznatky o vedení anaerobního procesu v laboratorních podmínkách, o možnostech sestavení jednoduché funkční aparatury a provedení návazných chemických analýz. Nabyté zkušenosti budou využity v připravovaném výzkumu anaerobních procesů na pracovišti Centra environmentálních technologií VŠB –TU Ostrava.

Základním poznatkem z provedených experimentů je možnost použití malého modelového vsádkového anaerobního bioreaktoru pro sledování kofermentace kejdy z bezstelivového ustájení dobytka s jinými biomateriály bez nutnosti řešit dokonalé kontinuální promíchávání reakční směsi výrobně náročným zařízením. K řešení dokonalejšího způsobu míchání a ohřevu a rovněž k řešení otázky kontinuální práce bioreaktoru bude přistoupeno ve fázi návrhu modelového bioreaktoru o větším objemu (viz následující stat' 9.2).

Jednoduché modelové bioreaktory o objemu 6 litrů (cca 4 litry vsázky) umožnily modelovou kofermentaci s cílem porovnání složení bioplynů a vyhodnocení vhodnosti využití vzniklých digestátů ke hnojení či rekultivaci. Ověřena byla značná závislost složení bioplynu na vlastnostech vstupní směsi kofermentovaných materiálů. Tato vstupní směs ovšem nebyla volena s ohledem na optimální digesci v průmyslovém měřítku (na zemědělských bioplynových stanicích), nýbrž jen s ohledem na zdárný chod procesu v laboratorním měřítku.

Získaná experimentální data je nutno považovat za základní údaje, které budou dále zpřesňovány za pomoci složitějších laboratorních modelů, poloprovozních a následně i provozních bioreaktorů s cílem optimalizace procesu anaerobní kofermentace směrem k získání maxima využitelné energie a kvalitativně vyhovujících hnojiv. Vyrobené bioplyny byly ve většině případů vhodné pro energetické využití ve spalovacích motorech či mikroturbinách. Připravené digestáty se ukázaly být z hlediska chemického složení téměř bez problémů aplikovatelné jako hnojiva pro zemědělskou půdu. Výjimky nesplněných parametrů (obsah mědi) budou dále ověřovány.

9.2 Modelový anaerobní bioreaktor o objemu 40 litrů

Na základě praktických zkušeností se stavbou a zprovozněním fyzikálního modelu diskontinuálního anaerobního bioreaktoru o reakčním objemu 6 litrů (viz stat' 9.1) byl navržen fyzikální model anaerobního bioreaktoru o větším objemu, uzpůsobený pro diskontinuální i kontinuální chod procesu. Návrh tohoto modelového bioreaktoru o objemu cca 40 litrů byl uskutečněn v rámci řešení projektu Ministerstva průmyslu a obchodu ev. č. IF-IM4/0089 s názvem „Výzkum a vývoj nových technologií kofermentace zemědělských odpadů a dalších biogenních materiálů s cílem zvýšení energetické a ekonomické efektivity procesu“, řešeného Centrem environmentálních technologií VŠB – TU Ostrava ve spolupráci s firmou Vítkovice – ENVI, a.s. od roku 2007 [123].

Předmětem řešení výše uvedeného projektu je rozpracování a další výzkum procesu kofermentace zemědělských odpadů s odpady z potravinářského průmyslu a kafilérií, biologicky rozložitelných komunálních odpadů a odpadů z ČOV, i s fytomasou z údržby veřejné zeleně či k tomuto účelu záměrně pěstovanou. Základním směrem řešení je zaměření na výzkum vlastností jednotlivých vstupních surovin a procesních podmínek (teplota, tlak, pH, přídavky mikroorganismů aj.) pro různé kombinace materiálů a různý obsah sušiny ve vstupních směsích do bioreaktorů ve vztahu k optimálním výtěžkům a vlastnostem vznikajících výstupních produktů (bioplynu a digestátu). Projekt má za cíl výzkum a vývoj nových, respektive zlepšených technologií kofermentace organických materiálů a transferu výsledků až na úroveň zkušebního (pilotního) zařízení, vykazujícího zlepšenou technologickou funkci a efektivnější využití obnovitelných zdrojů energie. Navržený modelový laboratorní bioreaktor o reakčním objemu 40 litrů poslouží jako mezičlánek mezi laboratorními testy anaerobní rozložitelnosti a poloprodučním zařízením o reakčním objemu přibližně 2 m³.

Schéma připravovaného laboratorního modelového bioreaktoru o reakčním objemu přibližně 40 litrů je uvedeno na obrázku č. 14. Denní produkce bioplynu z široké škály fermentovatelných materiálů se může pohybovat v rozmezí 0,5 až 3,0-násobku objemu reakční směsi. Čili z bioreaktoru o reakčním objemu 40 litrů získáme denně například 20 až 120 litrů bioplynu. Pro použití kontinuálního analyzátoru bioplynu (zamýšlený typ COMBIMASS GA-m Gas Analyzer, průtok bioplynu 500ml/min) bude vývin plynu z připravovaného modelu nedostatečný. Z toho důvodu budou analýzy složení vyvíjeného bioplynu prováděny semikontinuálně. Z hlediska dostupnosti technologie výroby modelu a z hlediska manipulovatelnosti a spotřeby dovážených surovin se reakční objem 40 litrů jeví jako optimální.

Laboratorní bioreaktor bude vyroben technologií svařování polypropylenových desek. Svým vnitřním tvarem bude bioreaktor odpovídat skutečným fermentorům, které se dnes často budují v zemědělství (například v současnosti dokončované bioplynové stanici v Pustějově na novojičínsku). Modelový bioreaktor o kruhové podstavě bude mít plášť z polypropylenu o tloušťce 10 mm. Před svařením bude plášť osazen potřebnými manipulačními otvory a přírubami. Vnitřní průměr bioreaktoru bude přibližně 350 mm, vnitřní výška do 450 mm. Střecha modelu bude kónická (úhel rozevření přibližně 145°).

Samostatná zásobní nádoba vstupní směsi (15 l) bude vyrobena z průhledné polyakrylátové trubice o světlosti 200 mm a výšce 500 mm. Nádoba bude opatřena cejchovanou stupnicí pro snadný odečet velikosti odčerpané dávky vstupní směsi. U dna zásobní nádoby bude odkalovací

otvor s ventilem pro odpuštění zbylé vstupní směsi v případě potřeby náhlé změny jejího složení. Shora bude možno do zásobní nádoby ponořit míchadlo, nebo jej tam umístit natrvalo s poklopem.

Čerpání vstupní směsi ze zásobní nádoby do modelového bioreaktoru bude zajišťovat malé kalové čerpadlo o výkonu cca 50 l/hod a to pomocí hadice minimální délky připojené na dávkovací otvor v horní části bioreaktoru, odkud bude spuštěno potrubí ke dnu reaktoru. Čerpadlo se zpětným ventilem nedovolí zpětné pronikání reakční směsi tlakem bioplynu do zásobní nádoby. Čerpání vstupní směsi bude moci být prováděno diskontinuálně nebo i kontinuálně.

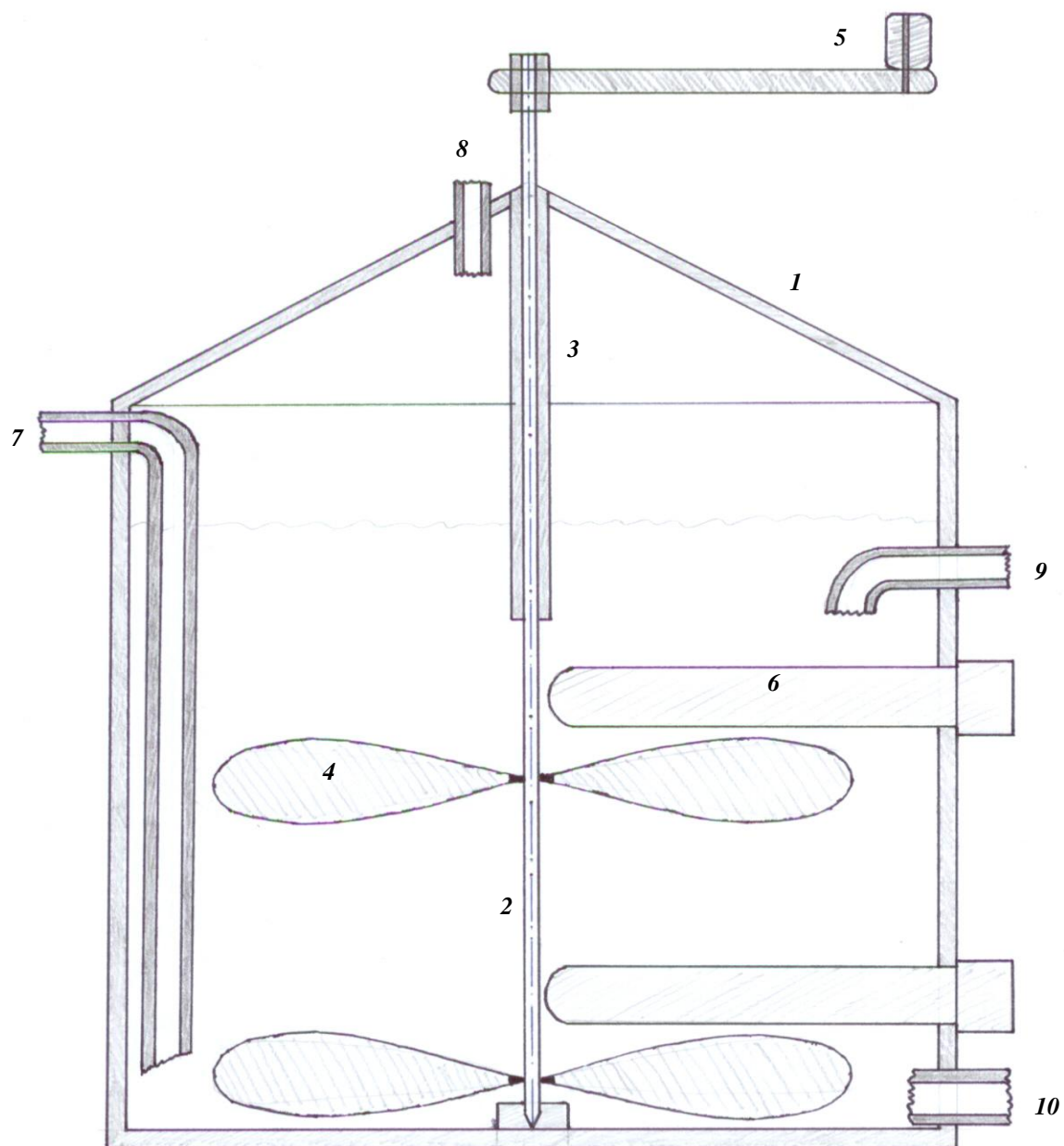
Bioreaktor bude při kontinuálním provozu zcela naplněn reakční směsí. Míchání modelové reakční směsi bude zajištěno nejjednodušším způsobem – ručním mícháním pomocí mechanického míchadla s vrtulovými listy ve dvou výškách reaktoru cca 5-krát denně.

Nastavitelný ohřev reakční směsi v rozmezí 35 až 42°C bude zajištěn dvěma akvarijními topidly o příkonu 150 W, tlakotěsně protaženými přírubami otvorů v plášti reaktoru. V horní části reakčního prostoru a ve spodní části reakčního prostoru budou umístěny celkem dva bimetalické teploměry. Všechny otvory bioreaktoru a přívodní hadice by měly mít světlost alespoň 25 mm.

Digestát bude z reakčního prostoru odcházet otvorem umístěným v horní části reaktoru a hadicí bude přepadávat do plynotěsně záchytné nádoby, z níž bude bioplyn hadicí odváděn do plynojemu. Při dlouhodobém kontinuálním experimentu nebude počáteční objem vzduchu v záchytné nádobě na závadu.

Plynojem bude polyakrylátový, mokrého typu, oceňovaný alespoň vzduchem, což je nejschůdnější cesta, jak měřit velmi malou produkci bioplynu z modelového bioreaktoru. Plynojem bude opatřen výpustním otvorem s ventilem a přírubou pro připojení čerpacího zařízení na LPG, pomocí něhož bude možno snadno odčerpát nebo odpustit zbytek bioplynu z předcházejícího experimentu a plnit plynojem bioplynem novým.

Jako pasterizační/hygienizační jednotka odpadů, které to vyžadují, bude použit kuchyňský tlakový hrnec co největšího objemu, postavený na výkonný vaříč. Tlak v hrnci bude měřen buď originálním tlakoměrem nebo dodatečně zabudovaným tlakoměrem.



- 1 – polypropylenová stěna modelového bioreaktoru
- 2 – osa mechanického míchadla
- 3 – průchodka míchadla
- 4 – lopatka míchadla
- 5 – klika míchadla
- 6 – topné těleso
- 7 – potrubí vstupní směsi
- 8 – odvod bioplynu
- 9 – odvod digestátu
- 10 – odkalovací výpust'

Obr. 14 Schéma modelového anaerobního bioreaktoru o reakčním objemu 40 litrů

Dále byl navržen soubor ukazatelů (veličin), které budou na připravovaném laboratorním modelovém bioreaktoru o reakčním objemu 40 litrů sledovány (viz tabulka 57). Shodný soubor ukazatelů bude pravděpodobně sledován i při provozu poloprovozního bioreaktoru o reakčním objemu 2 m³.

Tabulka č. 57: Návrh sledovaných ukazatelů pro anaerobní digestci na kontinuálním laboratorním a poloprovozním modelovém bioreaktoru

<i>Veličiny sledované ve vstupních materiálech (surovinách)*</i>			
Ukazatel	Značka	Jednotka	Způsob stanovení
Množství suroviny	V, m	dm ³ , kg	objem a hmotnost
Obsah celkové sušiny	TS	% hm.	veškeré látky = NL + RL sušením při 105 °C
Obsah organické sušiny	oTS	% hm.	ztráta žiháním při 550 °C
pH	KVV	-	kyselost vodného výluhu, elektronickým pH-metrem
Chemická spotřeba kyslíku	CHSK _{Cr}	g/g _{sušiny}	dichromanem draselným
Obsah celkového organického uhlíku	TOC	g/g _{sušiny}	oxidací peroxodisíranem draselným
Obsah celkového dusíku	N _{celk}	g/g _{sušiny}	převodem na amoniakální dusík
Obsah amoniakálního dusíku	N _{NH4}	g/g _{sušiny}	absorpční spektrofotometrií
Obsah celkového fosforu	P _{celk}	g/g _{sušiny}	oxidací na anorganické orthofosforečnany
<i>Veličiny sledované v reagující směsi v bioreaktoru</i>			
Ukazatel	Značka	Jednotka	Způsob stanovení
Obsah organické sušiny	oTS	% hm.	ztráta žiháním při 550 °C
pH	pH	-	elektronickým pH-metrem
Teplota	t	°C	plášťovaným dvojkovovým termočlánkem
Kyselinová neutralizační kapacita do pH 4,5	KNK _{4,5}	mmol/l	titrací HCl na metyloranž
Chemická spotřeba kyslíku	CHSK _{Cr}	g/g _{sušiny}	dichromanem draselným
Obsah amoniakálního dusíku	N _{NH4}	g/g _{sušiny}	absorpční spektrofotometrií
Koncentrace nižších mastných kyselin	NMK	mmol/l	titrací po destilaci
Obsah rozpuštěných anorganických solí	RAS	mg/l	sušením a žiháním filtrátu
<i>Veličiny sledované ve výstupních materiálech (digestátech)</i>			
1. z pohledu kontroly anaerobního procesu			
Ukazatel	Značka	Jednotka	Způsob stanovení
Množství suroviny	V, m	dm ³ , kg	objem a hmotnost
Obsah celkové sušiny	TS	% hm.	veškeré látky = NL + RL sušením při 105 °C
Obsah organické sušiny	oTS	% hm.	ztráta žiháním při 550 °C
pH	pH	-	elektronickým pH-metrem
Chemická spotřeba kyslíku	CHSK _{Cr}	g/g _{sušiny}	dichromanem draselným
Obsah celkového organického uhlíku	TOC	g/g _{sušiny}	oxidací peroxodisíranem draselným
Obsah celkového dusíku	N _{celk}	g/g _{sušiny}	převodem na amoniakální dusík
Obsah amoniakálního dusíku	N _{NH4}	g/g _{sušiny}	absorpční spektrofotometrií
Obsah celkového fosforu	P _{celk}	g/g _{sušiny}	oxidací na anorganické orthofosforečnany

2. z pohledu použití digestátů jako kalů na zemědělské půdě			
a) z pohledu živinné hodnoty			
Živina	Značka	Jednotka	Způsob stanovení
Obsah celkového dusíku	N _{celk}	% hm.	převodem na amoniakální dusík; spektrofotometrie
Obsah amoniakálního dusíku	N _{NH4}	% hm.	absorpční spektrofotometrie s Nesslerovým činidlem
Obsah dusičnanového dusíku	N _{NO3}	% hm.	převedení na soli kyseliny nitrosalicylové; fotometrie
Obsah vápníku	CaO	% hm.	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS), přepočet na oxidickou formu
Obsah hořčíku	MgO	% hm.	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS), přepočet na oxidickou formu
Obsah draslíku	K ₂ O	% hm.	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS), přepočet na oxidickou formu
Obsah fosforu	P ₂ O ₅	% hm.	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS), přepočet na oxidickou formu
b) z pohledu legislativy [108]			
Rizikové látky a prvky	Značka	Jednotka	Způsob stanovení
Obsah arzenu	As	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Obsah kadmia	Cd	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Obsah chromu	Cr	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Obsah mědi	Cu	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Obsah rtuti	Hg	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Obsah niklu	Ni	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Obsah olova	Pb	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Obsah zinku	Zn	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Absorbovatelné org. vázané halogeny	AOX	mg/kg	rentgenovou fluorescenční spektrometrií (XRFS)
Kongenery polychlorovaných bifenylů	PCB	mg/kg	stanovením PCB (kongenery 28, 52, 101, 138, 153, 180)
Mikrobiální složení	Značka	Jednotka	Způsob stanovení
Termotolerantní koliformní bakterie	-	KTJ/gsušiny	běžná metoda
Enterokoky	-	KTJ/gsušiny	fekální streptokoky
Salmonella sp.	-	KTJ/gsušiny	negativní nález
Veličiny sledované v bioplynu			
Ukazatel	Značka	Jednotka	Způsob stanovení
Produkce bioplynu	Q	m ³ /den	plynoměrem nebo přepočtem z tlaku
Produkce bioplynu	Q _{CH4}	m ³ /den	přepočtem z produkce a složení bioplynu
Obsah metanu	CH ₄	% obj.	IČ analyzátozem
Obsah oxidu uhličitého	CO ₂	% obj.	IČ analyzátozem
Obsah kyslíku	O ₂	% obj.	IČ analyzátozem
Obsah sulfanu	H ₂ S	% obj.	IČ analyzátozem
Obsah vlhkosti	H ₂ O	% obj., % rel.	digitálním vlhkoměrem

Poznámka: Soubor sledovaných ukazatelů bude postupně upřesňován v rámci řešení projektu Ministerstva průmyslu a obchodu ev. č. IF-IM4/0089 s názvem „Výzkum a vývoj nových technologií kofermentace zemědělských odpadů a dalších biogenních materiálů s cílem zvýšení energetické a ekonomické efektivity procesu“, řešeného Centrem environmentálních technologií VŠB – TU Ostrava ve spolupráci s firmou Vítkovice – ENVI, a.s. v letech 2007 až 2010 [123].

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Jednou z významných metod zpracování biogenních materiálů v současnosti je zpracování anaerobní digesí s částečným materiálovým a částečným energetickým využitím hmoty materiálu. Přitom je vhodné, aby tento proces probíhal pokud možno kontinuálně a s vysokou účinností. Tyto požadavky je možno zajistit za předpokladu, že směs anaerobně zpracovávaných materiálů bude mít víceméně konstantní složení, případně že vsázka materiálů do anaerobního bioreaktoru bude vytvářena řízeným způsobem. Tím je myšlena tvorba vhodných směsí anaerobně zpracovatelných materiálů (odpadů), vyhovující zejména z hlediska stability anaerobního procesu a z hlediska pokud možno konstantního obsahu složek poskytujících největší podíl energeticky bohatého plynného média – bioplynu. Vytváření takových směsí materiálů je možné uskutečnit pouze na podkladě znalosti chemických parametrů fermentovaných materiálů.

Z uvedených skutečností vycházel hlavní cíl disertační práce, kterým bylo experimentální ověření relevantních vlastností biogenních materiálů, jež připadají v úvahu pro anaerobní kofermentaci a sestavení databáze těchto materiálů a jejich vlastností.

K naplnění vytýčených cílů disertační práce byl zvolen následující postup:

- 1) **Realizace provozních experimentů na zemědělské bioplynové stanici.** Byly získány poznatky o chodu anaerobního procesu v reálných podmínkách a o technologii bioplynových stanic.
- 2) **Realizace laboratorních experimentů na modelových bioreaktorech.** Byly získány poznatky o možnostech laboratorních experimentů na fyzikálních modelech a poznatky o plynodajnosti a chování konkrétních směsí kofermentovatelných materiálů při stabilních předem definovaných procesních podmínkách.
- 3) **Realizace laboratorních stanovení hlavních materiálových parametrů fermentovatelných substrátů.** Byla rozpracována databáze vlastností anaerobně fermentovatelných materiálů sloužící jako zdroj informací pro rozhodovací proces při řízení anaerobní kofermentace.
- 4) **Návrh matematického modelu pro řízení skladby vstupní směsi.** Na základě získaných poznatků byl navržen matematický model, řešící optimalizaci vsázky na bioplynové stanici nebo při laboratorním a poloprovozním výzkumu, s ohledem na nejvyšší výtěžky bioplynu při stabilním chodu procesu.

Výsledky získané v rámci realizace seznamovacího provozního měření na zemědělské bioplynové stanici, identifikačního měření na těžce bioplynové stanici a laboratorního výzkumu na modelových bioreaktorech ukazují, že úspěšná realizace procesu mokré anaerobní digesce, tedy stav, kdy je dosaženo vysoké míry odbornání organické hmoty substrátů, je v reálných podmínkách ne vždy zajištěn, je tedy potřeba se zamýšlet nad environmentálně přijatelnými riziky, které jsou spjaté s nedokonalým chodem anaerobního procesu a navrhovat technicky a ekonomicky proveditelná zlepšení.

11 ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce je zaměřena na problematiku optimalizace procesu anaerobní kofermentace biogenních materiálů, probíhajícího v podmínkách zemědělských bioplynových stanic. Je uveden rozbor současného stavu poznání v oblasti kofermentace, vymezení rozhodujících kritérií pro proces kofermentace a návrh optimalizace tohoto procesu opatřeními vycházejícími z teoretického rozboru procesu, z laboratorních a provozních experimentálních zjištění a z teorie matematického i fyzikálního modelování.

Provedené experimenty potvrdily značnou závislost chodu současné zemědělské anaerobní technologie na vlastnostech vstupní směsi kofermentovaných materiálů a tedy i na přesnosti optimalizace skladby vsázky. Změny vstupních surovin se na produkci bioplynu ve velkých zemědělských bioplynových stanicích projevují i během několika hodin a opětovné ustálení procesu může naopak trvat řádově i dny. Tento faktor byl rozhodujícím při rozhodování o šíři experimentů, prováděných v laboratorních podmínkách a na skutečném díle. Provedené experimentální práce se týkaly především anaerobního zpracování masokostní moučky jako jednoho z problematických a přitom energeticky i materiálově velmi bohatých materiálů s omezenou šíří použití. Masokostní moučka se ukázala být snadno anaerobně rozložitelným materiálem, díky němuž lze zvýšit produkci bioplynu v podmínkách zemědělských bioplynových stanic.

Na základě provedených analýz chemického a mikrobiálního složení výstupního kapalného produktu procesu kofermentace na zemědělské bioplynové stanici (digestátu) je možno tento materiál označit za vyhovující pro aplikaci jako fertilizéru na zemědělské půdě. Lze ovšem předpokládat fluktuaci vlastností digestátu v závislosti na povaze a množství kofermentovaných materiálů, zvláště, jsou-li kofermentovány některé problematické materiály.

Obecně je složení vsázky pro anaerobní bioreaktory účelné regulovat tak, aby bylo dosaženo optimálního průběhu procesu mokré fermentace, to je, aby produkce bioplynu i obsahu metanu v něm byla na co nejvyšší konstantní úrovni při konstantním zatížení bioreaktoru. Dosažení tohoto cíle - regulované zvýšení produkce bioplynu, případně jeho výhřevnosti, je možné zejména cestou optimalizace složení vstupní směsi, umožňující zvýšení obsahu sušiny při současném respektování změny skladby látek tvořících vsázku a ekonomických podmínek provozu. Tento nesnadný úkol je vhodné řešit za pomoci počítačové techniky.

Zpracován byl matematický model, řešící problematiku optimalizace vlastností dávek vstupní směsi kofermentovaných materiálů. Uplatnění tohoto modelu vytvořením počítačového programu pro optimalizaci vstupní směsi na modelovém bioreaktoru, poloprovozním bioreaktoru a rovněž na zemědělské bioplynové stanici bude předmětem dalšího výzkumu, jenž přímo navazuje na tuto disertační práci.

12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Miltr L.: Příprava programu podpory výroby bioplynu. Sborník přednášek z konference „Možnosti výroby a využití bioplynu v zemědělství“, Třeboň, říjen 2001.
- [2] Obroučka K. a kolektiv: Možnosti tepelné dekontaminace (starých zátěží) masokostní moučky. Závěrečná zpráva o řešení veřejné zakázky MŽP ev. č. VaV/720/15/03, VŠB – TU Ostrava, Centrum environmentálních technologií, listopad 2005.
- [3] Archer D. B., Robertson J. A., Peck M. W.: The microbiology and control of anaerobic digestion. 43-92 in Whetley A (Ed.) Anaerobic digestion: A waste treatment technology. Crit.Rept. Appl.Chem. vol. 31, Elsevier appl.sci., London, 1990.
- [4] Dohányos M. a kol.: Anaerobní čistírenské technologie. NOEL 2000 s.r.o. Brno, 1998.
- [5] Gijzen H. J.: Anaerobic digestion of cellulosic waste by rumen-derived process. Disertation Univ. Nijmegen dept. Microbiol Nijmegen, Netherland, 1998.
- [6] Price E. C., Cheremisinoff P. N.: Biomass production & utilization. Energy technol. Ser. Ann Argot Sci., Butterworth Gr. Ann Argot MI, USA, 1981.
- [7] Wohlt J. E., Frobish R. A., Davis C. L., Bryant M. P., Mackie R. I.: Thermophilic methane production from dairy cattle waste. Biolog. Wastes 32, 193-207, 1990.
- [8] Bryant M. P.: Methane-producing bacteria (part 13) Begley's manual of determinative bacteriology, 8th. ed. The Williams & Wilkins Co., Baltimore, USA 1974.
- [9] Schulz H., Eder B.: Bioplyn v praxi. Teorie-projektování-stavba zařízení-příklady. HEL, 2.české vydání, Ostrava 2004
- [10] Cicek N.: A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater. Biosystems Engineering University of Manitoba, Winnipeg, Man. R3T 5V6, Canada, Canadian Biosystems Engineering/Le Genie des biosystème au Canada v 45, 2003. p 6.37-6.49, 2003.
- [11] Dohányos M., Zábranská J., Jeníček P.: Anaerobní technologie v ochraně životního prostředí. VŠCHT Praha, 1996.
- [12] Dohányos M., Koller J., Strnadová N.: Čištění odpadních vod. VŠCHT Praha, 1998.
- [13] Archer D. B., Robertson J. A., Peck M. W.: The mikrobiology and biochemistry of biomass production from solid wastes. Pages 393-405 in Alston Y. R., Richards G. E.: Landfill gas and Anaerobic digestion of solid waste. Proc. Int. Conf. 4.-7.10., Chester UK. Publ. Harwell Lab. Oxfordshire, 1988.
- [14] Ahn Y. H., Bae J. Y., Park S. M., Min K. S.: Anaerobic digestion elutriated phased treatment of piggery waste. School of Civil Urban/Environ. Eng. Yeungnam University, Kyungsan 712-749, South Korea. Water Science and Technology v 49 n 5-6 2004. p 181-189, 2004.
- [15] Straka F., Lau F.: Biogas & sulfur, IGT 9th Int. Symp. Gas oil, Environ. Biotechnology, Dec. 9-11, Colorado Springs, Colorado, USA, 1996.

- [16] Dohányos M., Zábranská J.: Anaerobní rozklad organických látek – produkce bioplynu. Sborník přednášek ČPNS, Biotechnologické procesy výroby plynu. Třeboň 19.4.1995.
- [17] Dohányos M., Zábranská J., Jeníček P.: Anaerobie '95: anaerobní procesy, současný stav a perspektivy dalšího rozvoje. Sborník přednášek 3. odborného semináře Olomouc. ČVVS Duben 1995.
- [18] Srivastava V. J., Conrad J. R., Fannin K. J., Isaacson H. R.: Methanogenic gasification of wood. Symp. Par. IGT Conf. Energy from biomass & wastes XIIIth., New Orleans, LA, USA, 1989.
- [19] http://cs.wikipedia.org/wiki/anaerobni_digesce
- [20] Stegmann R., Bade O.: Anaerobic digestion and production of biomass. Chimatra Workshop 2005, TUHH Hamburg.
- [21] Zábranská J., Dohányos M., Górecki J.: Vzájemné vztahy mikrobiálních skupin anaerobního ekosystému, zhodnocení a výběr vhodných metod stanovení jejich aktivity. HS 3031/17/88, VŠCHT Praha, 1988.
- [22] Kasali G. B., Senior E.: Effects of temperature and moisture on the anaerobic digestion of refuse. J. Chem. Tech. Biotechnol. 46, 31-41, 1989.
- [23] El-Mashad H. M., Zeeman G., Van Loon W. K. P., Bot G. P. A., Lettinga G.: Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. Dept. of Agricultural Engineering Faculty of Agriculture Mansoura University, El-Mansoura, Egypt. Bioresource Technology v 95 n 2 November 2004. p 191-201, 2004.
- [24] Zinder S. H.: Thermophilic waste treatment systems. In: Brock T.D. (ed.) Thermophiles: general, molecular and applied biology. Wiley-Interscience, New York, pp 257-277, 1986.
- [25] Nachaiyasit S., Stuckey D. C.: Effect of low temperatures on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). Imperial Coll of Science, Technology and Medicine, London, UK, Journal of Chemical Technology and Biotechnology v 69 n 2 Jun 1997. p 276-284, 1997.
- [26] Sterling M. C. Jr., Lacey R. E., Engler C. R., Ricke S. C.: Effects of ammonia nitrogen on H₂ and CH₄ production during anaerobic digestion of dairy cattle manure. Texas A&M Univ, College Station, TX, USA. Bioresource Technology v 77 n 1 Mar 2001. p 9-18, 2001.
- [27] Archem D. B., Histon G. M., Adams P., Wiecko H.: Hydrogen as a process control index in a pilot scale anaerobic digester. Biotechnol. Lett. 8, 197-202, 1986.
- [28] Hill D. T., Cobb S. A., Bolte J. P.: Using volatile fatty acids relationships to predict anaerobic digester failure. Trans ASAE 30, 496-501, 1987.
- [29] Bernard O., Hadj-Sadok Z., Pengov M., Dochain D.: Modelling, monitoring and control of anaerobic digestion processes. Univ. Catholique de Louvain, Belgiím. Journal A, vol.41, no.3, Page: 82-8, Publisher: Soft Vision, Sept. 2000.

- [30] Nozhevnikova A. N., Rebak S., Kotsyurbenko O. R., Parshina S. N., Holliger C., Lettinga G.: Anaerobic production and degradation of volatile fatty acids in low temperature environments. Russian Acad of Sciences, Moscow, Russia. Conference: 4th International Symposium on Environmental Biotechnology (ISEB 4), Noordwijkerhout, Neth, 19000410-19000412. Water Science and Technology v 41 n 12 2000. p 39-46 , 2000.
- [31] Nyo S.: „Myanma Spirulina“ 44th European Workshop Biotechnology of microalgae 29-30.5.2000, Rehbrücke, BDR.
- [32] Karim K., Klasson K. T., Hoffmann R., Drescher S. R., DePaoli D. W., Al-Dahhan, M. H.: Anaerobic digestion of animal waste: Effect of miziny. Department of Chemical Engineering Washington University Campus Box 1198, St Louis, MO 63130 4899, United States. Bioresource Technology v 96 n 14 September 2005. p 1607-1612 , 2005.
- [33] Karim K., Hoffmann R., Klasson K. T., Al-Dahhan M. H.: Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. Chemical Reaction Engineering Laboratory (CREL), Department of Chemical Engineering Washington University, St. Louis, MO 63130, United States, Water Research v 39 n 15 September 2005. p 3597-3606 , 2005.
- [34] Kargel J. S.: Planetary rept. 20-21 vol.XX (4) 7/8, 2000.
- [35] Slejška A., Váňa J.: Bioenergie z komunálního odpadu. EKO - ekologie a společnost, 1/1999, str. 8-9)
- [36] Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (Zákon o hnojivech), ve znění pozdějších předpisů. Sbírka zákonů České republiky, částka 54, ročník 1998.
- [37] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech (ve znění pozdějších předpisů). Sbírka zákonů České republiky, částka 71, 2001. Sbírka zákonů České republiky, částka 54, ročník 1998.
- [38] Váňa J.: Je hnůj odpadem nebo organickým hnojivem?. Biom.cz, 18.8.2005, dostupné z www: <http://biom.cz/index.shtml?x=447170>.
- [39] Váňa J.: Zemědělské odpady. Biom.cz, 24.1.2002, dostupné z www: <http://biom.cz/index.shtml?x=62131>.
- [40] <http://encyklopedie.biom.cz/wiki/index.php/Kejda>.
- [41] Křenek V.: Výroba bioplynu a jeho využití. Přednášky k předmětu Energetické využití a zneškodňování odpadů. ZČU - Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, KKE - Katedra energetických strojů a zařízení.
- [42] Slejška A., Pastorek Z., Váňa J., Čemerková A.: Exkurze po bioplynových stanicích - 1 - Kladruby. Biom.cz, 3.7.2003, dostupné z www: <http://biom.cz/index.shtml?x=94826>.
- [43] Legrand R. a sp.: A systém analysis of the biological gasification of MSW and an assessment of proven technologies. Pap. 27, Symp. Pap. IGT Chicago, Energy from biomass and wastes XIIIth (13.-17.2.), New Orleans, L.A., USA, 1989.

- [44] Op den Camp H.J.M. a sp.: Application of rumen microorganisms in the anaerobic fermentation of an organic fraction of domestic refuse. *Biological wastes* 30, pp. 309-316, 1989.
- [45] Kára J.: Biologicky rozložitelný komunální odpad. *Odpadové fórum*, str. 32, 11/2005.
- [46] Edelmann W., Baier U., Engeli H.: Environmental aspects of the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes and of solid agricultural wastes. *Arbi GmbH, CH-6340 Baar, Switzerland. Water Science and Technology* v 52 n 1-2 2005. p 203-208, 2005.
- [47] Frosttell B. a sp.: Methane generation from the anaerobi digestion of beet pulp proc., *Proc. Symp. IGT Energy from biomass and waste VIIIth.*, pp. 903 – 922, Lake Buena Vista, Fa USA, 30.1. - 3.2., 1984.
- [48] Lane A. G.: Laboratory scale anaerobi digestion of fruit and vegetable solid waste. *Biomass*, 1984, č. 5, s. 245.
- [49] Hutňam M., Drtil M., Mraková L.: Využití vyslazených řepných rezků na výrobu bioplynu I. Laboratorný prieskum. *Listy cukrovarnické a řepařské*, 115, č. 11, 1999, s. 303 – 308.
- [50] Hutňam M., Drtil M., Mraková L.: Využití vyslazených řepných rezků na výrobu bioplynu II. Poloprevádzkové zariadenie. *Listy cukrovarnické a řepařské*, 115, č. 12, 1999, s. 348 – 352.
- [51] Širůček E., Rybář R.: Zemědělsko potravinářský komplex jako význačný producent energeticky využitelných odpadů a biomasy pro procesy anaerobní digesce. *Odpadové fórum 2007*, 18.-20.4.2007 Milovy.
- [52] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu, které nejsou určeny pro lidskou spotřebu. Poslední upravená verze ze dne 25. 3. 2005.
- [53] Belza R.: Požadavky na zpracování materiálů v závodech na výrobu bioplynu. *Biom.cz*, 28.7.2004, dostupné z [www: http://biom.cz/index.shtml?x=191579](http://biom.cz/index.shtml?x=191579).
- [54] Amon T., Boxberger J., Lindworsky J., Scheibler M.: *Biomass production in agriculture: safety guidelines, cofermentation and emissions from combined heat and power couplings*. Institute Landtechnik. Universitat F. Bodenkultur. Wien, 1998.
- [55] Vilppunen P., Harmaa K.: Energy production by anaerobic digestion of waste sludges from wood processing industries. *Pap. 24, Symp. Pap. IGT Chicago, Energy from biomass and wastes XIIIth, New Orleans, L.A., USA, 1989.*
- [56] Seely R. J.: *Comparative anaerobic digestion of organic residuem.* (Ed. Wise D.L.) *CRC Ser. Bioenergy Systeme*, pp. 157-170, CRC Press Inc., Boca Raton, Fl. USA, 1983.
- [57] Callaghan F. J., Wase D. A. J., Thayanithy K., Forster C. F.: Co-digestion of waste organic solids: batch studies. *Univ of Birmingham, Birmingham, Engl. Bioresource Technology* v 67 n 2 Feb 1999. p 117-122, 1999.

- [58] Suyasov N. A., Shakir I. V.: Studying of yeast's cultures fermentation processes on fatty substratum. D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Industrial Biotechnology, Moscow, 125047, Russian Federation. Conference: CHISA 2004 - 16th International Congress of Chemical and Process Engineering , Prague, Czech Republic, 2004.
- [59] Mladenovska Z., Dabrowski S., Ahring B. K.: Anaerobic digestion of manure and mixture of manure with lipids: Biogas reactor performance and microbial community analysis. Environ. Microbiol./Biotechnol. Res. BioCentrum Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark. Water Science and Technology v 48 n 6 2003, p. 271-278 , 2003.
- [60] Váňa J.: Kofermentace zemědělských, komunálních a průmyslových bioodpadů při anaerobní digesci kejdy prasat. Biom.cz, 28.12.2001, <http://biom.cz/index.shtml?x=60651>.
- [61] Straka F. a kol.: Bioplyn. Gas s.r.o., Říčany, 2003, 517 s. ISBN 80-7328-029-9.
- [62] Chakravarti B.: Trace constituents in landfill gas. Task rept. on Corros. pottenital, Final rept. GRI 87/0013.3, Gas res. Institute Chicago, USA, 1985.
- [63] Rettenberg G.: Trace compounds in landfill gas-consequences for gas utilization. Proc. GRCD 8th Int. Landfill gas symposium 9.-11.4., San Antonio TX,USA, 1985.
- [64] Young P. J., Heasman L. A.: An assessmennt of the odor and toxicity of the trace components of landfill gas. Proc.GRCD 8th int. Landfill gas symposium, 9.-11.4., 93-114, San Antonio TX, USA, 1985.
- [65] Drautzburg G.: Entschwelegung von Biogasen an Gasreinigungsmasse. GWF – Gas/Erdgas 126 (1), pp. 36-40, 1985.
- [66] Vyhláška č. 209/2005 Sb. kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění vyhlášky č. 401/2004 Sb., částka 75, ročník 2005.
- [67] Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva, částka 137, ročník 2000.
- [68] Vyhláška č. 401/2004 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, částka 130, ročník 2004.
- [69] Nařízení vlády č. 103/2003 Sb. o stanovení zranitelných oblastí a o používání a skladování hnojiv a statkových hnojiv, střídání plodin a provádění protierozních opatření v těchto oblastech, částka 42, ročník 2003.
- [70] Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 274/1998 Sb. o skladování a způsobu používání hnojiv, částka 97, ročník 98.
- [71] Nařízení Komise (ES) č. 208/2006 ze dne 7. února 2006, kterým se mění přílohy VI a VIII nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002, pokud jde o normy zpracování pro zařízení na výrobu bioplynu a kompostování a požadavky na hnůj.

- [72] Váňa J.: Využití digestátů jako organického hnojiva. Biom.cz [online]. 2007-04-25. Dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=1996029>>.ISSN:1801-2655.
- [73] Gomez X., Cuetos M. J., Garcia A. I., Moran A.: Evaluation of digestate stability from anaerobic process by thermogravimetric analysis. Chemical Engineering Department, University of Le'on, IRENA-ESTIA, Avda. de Portugal 41, Le'on 24071, SpainReceived 3 May 2004; accepted 29 July 2004, Available online 28 August 2004.
- [74] Wellinger A.: Energy from biomas and landfill gas – European outlook. Nova Energie Ltd. Leader task 37.
- [75] Slejška A.: Exkurze po bioplynových stanicích - 3 - Landau. Biom.cz, 6.8.2002, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=97794>>.
- [76] Cooper J. I., Foster D. E.: Anaerobic digestion of fermentation wastes in fixed-bed, downflow digester. Miles Inc., 1989.
- [77] Austermann-Haun U., Seyfried C. F.: Experiences gauner in the reactor operation of anaerobic plants in Germany. Water Sci. Tech., 30, 415-424, 1994.
- [78] Bhattacharya T. K., Mishra T. N.: Biodegradability of dairy cattle manure under dry anaerobic fermentation process. Dept. Farm Machinery and Power Eng. College of Technology G B Pant Univ. Agric. and Technol., Pantnagar, Uttaranchal, India. Journal of the Institution of Engineers (India): Agricultural Engineering Division v 84 n JUN. June 2003. p 9-11, 2003.
- [79] <http://www.bioprofit.cz>., 6.7.2006.
- [80] Sladký V.: Zprávy ze studijní cesty do Waldhausen-Moosdorf v roce 2004 a 2005. Praha: VUZT, 2005.
- [81] Ustjak, S., Váňa J.: Popis vhodných technologií biozplyňování. Sborník CZ Biom, s. 77-81, Praha, 2004.
- [82] Pastorek Z.: Aktuální situace v oblasti výroby bioplynu v ČR. Biom.cz, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=45182>>.
- [83] Slejška A., Sladký V.: Exkurze po bioplynových stanicích - 2 - Mettmach. Biom.cz, 22.7.2002, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=96533>>.
- [84] Váňa J.: Bioplyn v České republice. Biom.cz, 5.11.2001, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=45183>>.
- [85] Gregersen K. H.: Centralised biogas plants. Danish Ind. Of agriculture and fish econ., October 1999.
- [86] Mužík O., Slejška A.: Možnosti využití anaerobní fermentace pro zpracování zbytkové biomasy. Biom.cz, 14.7.2003, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=141272>>.
- [87] Ščasný M.: Od spalování k většímu třídění a kompostování bioodpadu, ekonomický pohled. www.biom.cz, 7.10.2002.
- [88] Kajan M.: Výroba a využití bioplynu v zemědělství. Biom.cz, 26.11.2002, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=110712>>.

- [89] Kajan M.: Bioplynová stanice Třeboň. Biom.cz, 7.6.2004, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=183796>>.
- [90] Schulz H., Mittelleitner H.: Erhebung von Daten an Praxi-Biobasanlagen. Endbericht zum Forschungsvorhaben der Schweis-furth-Stiftung, München 1988.
- [91] Meyer D.: Making electricity from manure. BioCycle v 44 n 1 January 2003. p 52-55, 2003.
- [92] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2006, ze dne 21. listopadu 2006, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů.
- [93] Flankenber D., Kaltschmitt M.: Energy from biomass. Status and Opportunities. Institut für Energetik und Umwelt. Germany 2003.
- [94] Kraemer P.: Design principles for decentralized wastewater treatment systems (DEWATS). Presentation at „EcoSan Workshop“ Bangalore. 2003.
- [95] Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií (ve znění pozdějších předpisů). Sbírka zákonů České republiky, částka 115, ročník 2000.
- [96] Kotoulová Z., Váňa J.: Příručka pro nakládání s komunálním bioodpadem. MŽP, Praha 2001.
- [97] Köttner M., Shan M., Václav Sladký: Bioplyn v Německu. Biom.cz, 6.10.2003, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=148446>>.
- [98] Kozák J.: Zkušenosti s výstavbou zemědělských bioplynových stanic. Biom.cz, 16.12.2002, dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=112300>>.
- [99] Pastorek Z., Kára J., Jevič P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie. FCC Public Praha, 2004.
- [100] Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), (ve znění pozdějších předpisů). Sbírka zákonů České republiky, částka 131, ročník 2000.
- [101] Ahring B. K., Angelidaki I.: Monitoring and controlling the biomas process. Proc. of the 8th Inter. conf. on anaerobic digestion, Vol 1, pp. 40-50, Sedan, Japan, 1997.
- [102] <http://df.biom.cz/zarizeni> : Bioplynová stanice firmy GT 92 s.r.o. 20.2.2005.
- [103] Kotala J.: Provozní řád zpracovny kejdy Gigant Velké Albrechtice. GT 92 s.r.o., Velké Albrechtice, duben 1995.
- [104] Jeníček P., Stará H.: Testy anaerobní rozložitelnosti – odpad celulózka, VŠCHT Praha, září 2003.
- [105] Kuča R.: Vliv přídavku masokostní moučky na karbonizační proces. Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, červen 2004.
- [106] Schulz H., Eder B.: Bioplyn v praxi. HEL, Ostrava 2004.
- [107] Tedom, s.r.o. Dostupný na <http://www.tedom.cz/kogenerace>.

- [108] Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb., ve znění 504/2004 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Sbírka zákonů ČR, částka 145, ročník 2001.
- [109] Obroučka K. a kol: Možnosti tepelné dekontaminace (starých zátěží) masokostní moučky. Dílčí zpráva o řešení projektu MŽP ev. č. VaV/720/15/03 VŠB – TU Ostrava, Centrum environmentálních technologií, listopad 2004.
- [110] Obroučka K., Rusín J.: Zvýšení produkce elektrické energie na bioplynové stanici závodu GT92 s.r.o. Velké Albrechtice. (Dílčí zpráva o výsledcích identifikačního měření). VŠB – TU Ostrava, Centrum environmentálních technologií, 2005.
- [111] Obroučka K., Rusín J., Jurečka P.: Experimentální ověření možnosti zvýšení výroby bioplynu úpravou složení vsázky. Odpadové fórum 2006 – Výsledky výzkumu a vývoje pro odpadové hospodářství, str. 3164 až 3171, sborník přednášek 3., 2006.
- [112] Obroučka K., Rusín J., Jurečka P.: Vliv skladby vstupní směsi na efektivnost anaerobního procesu. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – TU Ostrava č.1, 2005, str. 183 až 208, ročník LI, Řada vědecko-výzkumných ústavů, 2005.
- [113] Provozní kniha obsluhy bioreaktorů firmy GT 92, s.r.o. Velké Albrechtice. Záznamy od 22.5.2004 do 8.2.2005.
- [114] Michal P.: Bioplyn: kejdou z výroby bioplynu zaorávat. Betriebswirtschaftlich Nachrichten, 2005, č. 11, s. 251.
- [115] Byczanski P., Obroučka K.: Vytváření směsí spalitelných odpadů. Zpráva o řešení projektu GAČR 106/01/1547, VŠB-TU Ostrava, březen 2003.
- [116] Byczanski P., Obroučka K.: Návrh matematického modelu pro optimalizaci vytváření směsí spalitelných odpadů pro spalovny. Chemické listy, č. 8, 2007.
- [117] Banout J.: Program "Composter" a možnosti jeho využití při optimalizaci surovinové skladby kompostu. Biom.cz, 4.12.2002, <http://biom.cz/index.shtml?x=111676>.
- [118] Epstein E.: The Science of Composting. Technomic Publishing Company. Pennsylvania. USA, 1997.
- [119] ČSN 83 0550 Fyzikálně chemický rozbor kalů. Stanovení celkové sušiny, zbytku po žihání a ztráty žiháním. Část 3. ČSNI Praha, 1978.
- [120] Obroučka K. a kol.: Výzkum spalování odpadů. Závěrečná zpráva o řešení veřejné zakázky MŽP ev. č. VaV/720/16/03, VŠB-TU Ostrava, CET, listopad 2005.
- [121] Obroučka K., Fiedor J.: Termochemické vlastnosti tuhých spalitelných odpadů. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, ročník LI, Řada vědecko-výzkumných ústavů, číslo 1, str.1 – 32, rok 2005.
- [122] Fiedor J.: Tvorba databáze vlastností spalitelných odpadů pro účely optimalizace spalování odpadů. Disertační práce, VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [123] Projekt Ministerstva průmyslu a obchodu programu IMPULS ev. č. IF-IM4/0089 „Výzkum a vývoj nových technologií kofermentace zemědělských odpadů a dalších biogenních materiálů s cílem zvýšení energetické a ekonomické efektivnosti procesu“,

řešeno Centrem environmentálních technologií VŠB – TU Ostrava ve spolupráci s firmou Vítkovice – ENVI, a.s., 2007.

- [124] Rynk R.: On-Farm Composting Handbook. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES). USA, 1992.
- [125] Cagalová S.: Termochemické charakteristiky bio-odpadů a materiálů. Diplomová práce, FMMI VŠB – TU, Ostrava, 2007.

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ABP	animal by-products
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
BSE	bovinní spongiformní encephalopathie
ČOV	čistírna odpadních vod
DTA	diferenční termická analýza
DTG	derivační termogravimetrie
KTJ	kolonie tvořící jednotku (jednotka mikrobiálního znečištění)
LPG	liquid petroleum gas
MBM	masokostní moučka
MBR	technologie membránových bioreaktorů
NDIR	nuclear detector infra-red
OFMSW	organics and food from municipal solid waste
OL	organické látky
PCB	polychlorované bifenyly
VDJ	velká dobytčí jednotka = 500 kg živé porážkové hmotnosti
VÚZT	Výzkumný ústav zemědělské techniky Praha Ruzyně

14 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

AOX	absorbovatelné halogenované uhlovodíky
C_nH_m	nenasycené uhlovodíky
C_xH_y	nasycené uhlovodíky
C:N	poměr obsahu organického uhlíku a organického dusíku, 1
C:P	poměr obsahu organického uhlíku a organického fosforu, 1
CHSK	chemická spotřeba kyslíku, g/g sušiny
N_{celk}	obsah celkového dusíku, g/g sušiny
N_{NH_4}	obsah amoniakálního dusíku, g/g sušiny
N_{NO_2}	obsah dusitanového dusíku, g/g sušiny
N_{NO_3}	obsah dusičnanového dusíku, g/g sušiny
oTS	obsah organické sušiny substrátu, % hm.
pH	záporně vzatý logaritmus koncentrace vodíkových kationů v substrátu, 1
P_{celk}	obsah celkového fosforu, g/g sušiny
Q_n	výhřevnost za normálních podmínek, MJ/m _N ³
S_{celk}	obsah celkové síry, g/g sušiny
TOC	obsah celkového organického uhlíku v substrátu, % sušiny, g/g sušiny
TS	obsah celkové sušiny v substrátu, % hm.
$Y_{\text{CH}_4/s}$	teoretická měrná produkce metanu, g/g sušiny
ZŽ	ztráta žiháním, g/g sušiny
% CH ₄	teoretický obsah metanu v bioplynu, % obj.

15 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 Grafické vyhodnocení výsledků ověřovacího provozního měření na bioplynové stanici firmy GT 92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích (prosinec 2004).
- Příloha č. 2 Grafické vyhodnocení výsledků dlouhodobého provozního měření na bioplynové stanici firmy GT 92, s.r.o. ve Velkých Albrechticích (září - říjen 2005).
- Příloha č. 3 Databáze vlastností anaerobně fermentovatelných materiálů.